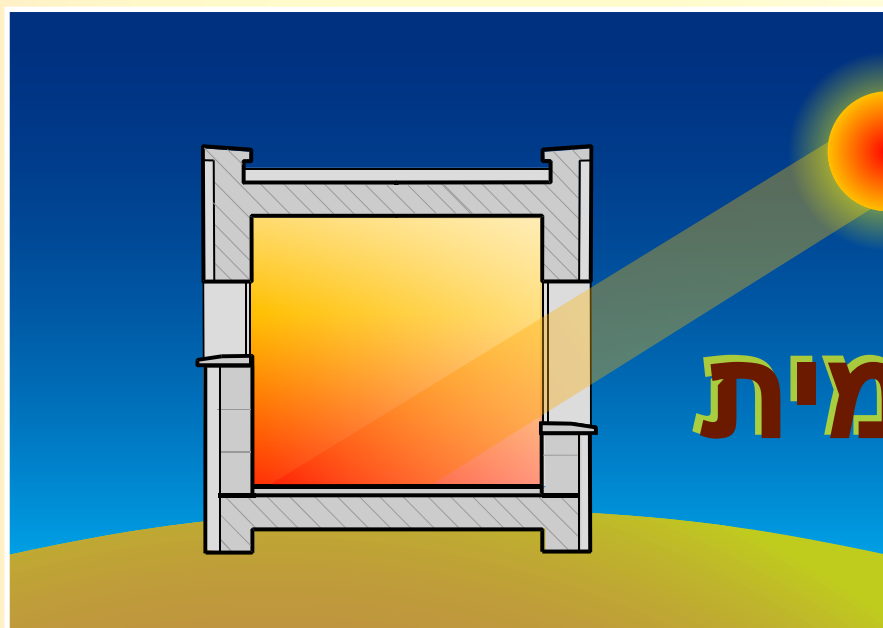




המדריך לבנייה ביו-אקלימית בישראל

היחידה לאדריכלות ובינוי ערים במדבר

המחלקה לאדם במדבר, המכון למחקר סביבות צחיחות

המכונים לחקר המדבר ע"ש יעקב בלאושטיין

אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

מדינת ישראל - משרד התשתיות הלאומיות - אגף מחקר ופיתוח

MONI-RD-19-10

יוני 2010

דוד פרלמוטר • אביתר אראל • יצחק מאיר • יאיר עציון • יודן רופא

הפקה גרפית ואנימציה: קובי נהון



תוכן עניינים

מושגי יסוד

1. פיתוח בר-קיימא 3
2. סביבה, אנרגיה ובנייה ירוקה 8
3. אזורי אקלים 9
4. אקלים עירוני 12
5. נוחות תרמית 16
6. מעבר אנרגיה 24
7. מיקרו-אקלים 36
8. גיאומטריית שמש 43
9. בריאות ואיכות אויר פנים 45

נושאי תכנון

המבן

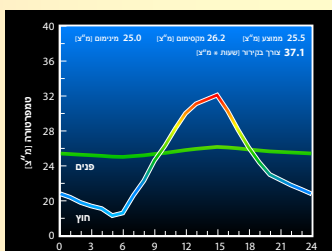
10. מיקום הישוב 48
11. מערכת התנועה 51
12. חתך הרחוב 54

13. שטחים פרטיים פתוחים 61
14. תכנית מתאר מודעת סביבה 67
15. מקבץ הבנינים 74

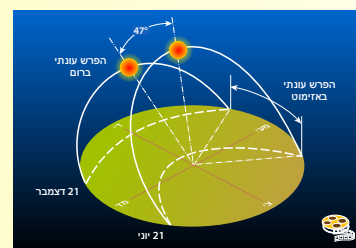
הבנין

16. בנין מודע אקלים 83
17. צורת המעטפת 86
18. קיר רב-שכבתי 89
19. חומרי בידוד 92
20. מסה תרמית 97
21. גג מגן 99
22. חומרי גמר 107
23. פתחים בבנין 109
24. חימום וקירור פסיבי 128
25. בנין הדגמה באקלים מדברי 145
- מקורות 148
- מפתח 152

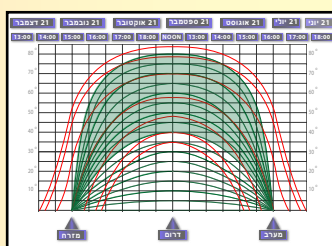
כלים אינטראקטיביים



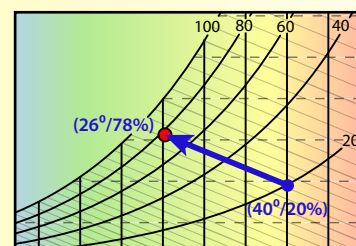
הדמיה תרמית



מסלולי שמש



הצללת חלון



טבלה פסיכרומטרית



1. פיתוח בר-קיימא

1. רקע היסטורי

המושג "פיתוח בר-קיימא" הפך שגור בשנים האחרונות והכל טוענים שהם מכוונים אליו בפעילותם. בישראל התקבלה רשמית החלטת ממשלה הרואה בפיתוח בר-קיימא את אופן הפיתוח המועדף. מנגד יש הטוענים שמרוב שימוש המושג רוקן מתוכן ממשי. פרק זה בא להסביר את מקורותיו של המושג הזה, להציג כמה הגדרות מקובלות שלו, להסביר אותו ואת הפעילות שנעשתה בארץ לקידומו והתאמתו, ולבסוף לעמוד על התרומה שיכולים בניינים לתרום ליצירת פיתוח בר-קיימא.



1.2 החרפת המשבר הסביבתי

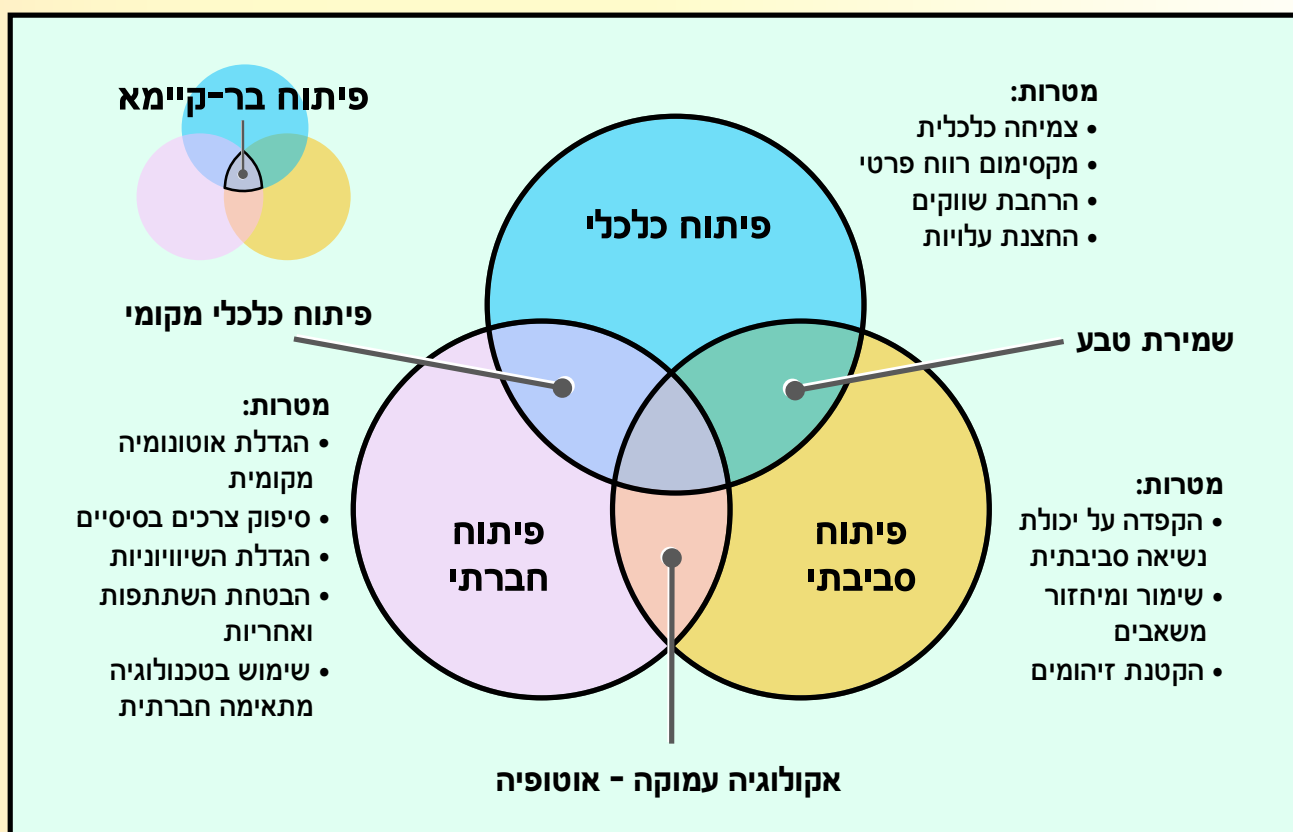
בשנות ה-70 של המאה הקודמת, התחזקה המודעות לגידול בנזקים הסביבתיים ולמשבר הסביבתי העולמי. קבוצת מדענים ידועי שם, בהזמנת גוף מעורב של אנשי עסקים, ומדינאים הזמינה דו"ח סביבתי עולמי על הגבולות לפיתוח.^[1] הדו"ח עורר סערה בעולם המדעי, ובמדיניות בינלאומית, בין השאר משום שהוא יצר קשר ברור בין עצם הפיתוח הטכנולוגי והתעשייתי ובין נזקים סביבתיים, והזהיר לראשונה מפני התמוטטות המערכת האקולוגית העולמית בעקבות פעילות האדם. בשנת 1983 האו"ם הקים ועדה בינלאומית לדיון בנושאי סביבה ופיתוח, וב-1987 ועדה זו פרסמה את הדו"ח שלה, Our Common Future, הקרוי גם דו"ח ברונטלנד, ע"ש יושבת ראש הוועדה (ראש ממשלת נורבגיה לשעבר גרו הרלם ברונטלנד).^[2] דו"ח זה כלל לראשונה את המושג פיתוח בר-קיימא (Sustainable Development).

1. Meadows et al., 1972. כעבור 32 שנים פורסם דו"ח מעקב (Meadows et al., 2004) שבדק את התממשות התחזיות המקוריות, ומצא שלמרות השינויים הטכנולוגיים הרבים, שלא נצפו מראש, החמרת תמונת המצב הסביבתית תואמת באופן כללי את התחזיות הפסימיות משנת 1972.

2. Bruntland, 1987.

1.1 מודעות סביבתית והגנה על הסביבה

לפני שנפנה להגדרות חשוב להבין את ההקשר ההיסטורי והפוליטי שבמסגרתו נוצר המושג. המודעות לסביבה וההגנה על הסביבה החלו להיווצר בארצות אירופה וצפון אמריקה בהקשר של התקדמות התיעוש והעירור, וכתגובה להם. ניתן להגדיר שלושה שלבים, או רמות של מודעות סביבתית. הרמה הראשונה היא המודעות לנזק שנגרם לסביבה הטבעית על ידי פעילות האדם, ונקיטת פעולות של שימור הטבע ושימור הגישה של בני אדם למקומות טבעיים. במסגרת פעילות זו הוגדרו הפארקים העירוניים הראשונים, והפארקים הלאומיים הראשונים שהבטיחו שימור של מקומות טבעיים בעלי יופי מיוחד, או חשיבות מיוחדת, ואת הגישה החופשית של הציבור אליהם. הרמה השנייה של המודעות הסביבתית, ושל ההגנה על הסביבה הוא בקשירת הקשר בין פיתוח ובין נזקים סביבתיים. רמה זו מאופיינת על ידי פעילות לעצירת פיתוח, ובמקרה שלא ניתן לעצור אותו, אמדן הנזקים שלו, ויצירת מנגנונים להגנה על הסביבה מפני הנזקים, או פיצוי לתושבים מפני הנזקים הצפויים. הרמה השלישית של מודעות סביבתית היא זו הקושרת בין הפיתוח לצורך החברה האנושית מחד, ובין המערכת הסביבתית התומכת בו מאידך, ומדגישה את הצורך בהתאמת הפיתוח למגבלות של המערכת הסביבתית – כדי לאפשר את היותו בר-קיימא לאורך הזמן.



איור 1.1. שלושת מעגלי פיתוח בר-קיימא.

העוני עצמו, כך נטען גם בדו"ח, הוא גורם בעייתי מבחינה סביבתית משום שהוא מעודד ילודה, תורם לגידול האוכלוסין, ומחייב שימוש במשאבים מתכלים לאספקת צרכי החיים הבסיסיים ביותר. על כן זיהה הדו"ח את הקשר בין פיתוח, הדרוש כשלעצמו כדי לספק את צרכי הקיום של הדור הנוכחי, ובין שמירת הסביבה, כדי שגם הדורות הבאים יוכלו להשתמש במשאבים שהסביבה מספקת לאדם.

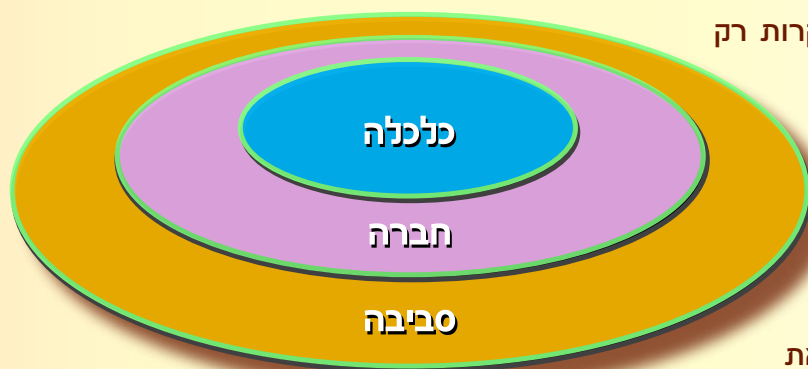
1.4 דו"ח ברונטלנד

דו"ח ברונטלנד נשען על ארבע עקרונות ליצירת פיתוח בר-קיימא של החברה האנושית בעולם:

- חיסול העוני בעולם, ובמיוחד בעולם השלישי, נחוץ לא רק מסיבות אנושיות, אלא גם מסיבות סביבתיות
- על העולם הראשון להקטין את צריכת המשאבים ופליטת הפסולת שלו
- שיתוף פעולה בינלאומי בנושאים סביבתיים איננו אופציה אלא הכרח

1.3 הבדלי ההשקפות בין מדינות מתועשות ומתפתחות

בדיוני ועדות האו"ם ובכנסים בינלאומיים בנושא התעורר עימות על רקע הבדלי ההשקפות על המשבר הסביבתי בין המדינות המתועשות והמדינות המתפתחות או כפי שנקראו אז מדינות העולם השלישי. גישת המדינות המתועשות הייתה להדגיש את הצורך בהגבלת הפיתוח, ובבקרה על צריכת אנרגיה ומשאבים. המדינות המתפתחות, לעומת זאת, טענו כי המשבר הסביבתי הוא תוצאה של הפעילות הכלכלית, רמת החיים והצריכה של תושבי המדינות המתועשות, ועל כן, על אלה מוטלת החובה להגביל את הנזקים הסביבתיים שהן יוצרות. הרבה בעיות סביבתיות במדינות מתפתחות, טענו, הן דווקא תוצאה של חוסר בפיתוח כלכלי וחברתי, והישענות על כלכלת קיום כדי לקיים את עצמם נאלצים חקלאים לעבד אדמות שוליות מבחינת פוריות, ובכך לדרדר אותן עוד ולהאיץ את תהליך המידבור, לברא יערות כדי לגדל גידולים לשוק הסחורות, או להשתמש בעצים להסקה מחוסר משאבים לקניית דלקים מחצביים.



- שינוי לכיוון של פיתוח בר-קיימא יכול לקרות רק באמצעות פעילות קהילתית המתייחסת ברצינות לתרבויות מקומיות

1.5 קיימות והפוליטיקה הבינלאומית

לאחר פרסום הדו"ח, הקימו מדינות שונות ועדות לדון בו ולפתח מדיניות לאומית שתגיב להמלצותיו. בשנת 1992, כינס האו"ם את הוועדה הבינלאומית הראשונה לדיון בנושא הסביבה הגלובלית שהתקיימה בריו דה ז'ניירו שבברזיל. בסוף אותה ועידה התפרסמה הצהרת ריו, שאימצה את העיקרון של פיתוח בר-קיימא והפכה אותו לבסיס למדיניות הסביבתית העולמית והבינלאומית.

2. הגדרת פיתוח בר-קיימא

ישנן הגדרות רבות לפיתוח בר-קיימא. להלן נביא שלוש מבין ההגדרות הללו המעידות על ההיבטים השונים של המושג. ההגדרה הראשונה היא:

"פיתוח העונה על צרכי היום מבלי לפגוע ביכולת הדורות הבאים לענות לצרכיהם"

הגדרה זו מדגישה את עקרון השוויון הבין-דורי, ואת שינוי ההשקפה על היחס בין האדם והעולם ומשאביו מיחס של בעלות, אדנות וניצול ליחס של אחריות, שמירה וניטור. היא מהווה גם הרחבה של מושג ההורות – מזה הפרטי והמובן מאליו של הרצון והחובה של הורים לדאוג לצאצאיהם לדאגה לחברה האנושית בכללותה. הדור הנוכחי חייב לדאוג לצרכיו (על ידי פיתוח), אולם הוא צריך לעשות זאת תוך כדי שמירה על משאבי הסביבה באופן כזה שגם הדורות הבאים יוכלו לדאוג לצרכיהם.

ההגדרה השנייה מפרטת את שלושת המרכיבים של פיתוח בר-קיימא. היא גם כוללת בתוכה את ההבנה שפיתוח בר-קיימא איננו נטול התנגשויות בין ערכים שונים. מהותו של פיתוח בר-קיימא היא במציאת האיזון בין הערכים השונים. על כן הגדרה שנייה היא:

"פיתוח בר-קיימא מהווה איזון בין -

- צורך בפיתוח כלכלי כדי להתגבר על עוני
- צורך בהגנה סביבתית על אויר, מים, קרקע ומגוון המינים שכולנו תלויים בהם בסופו של דבר

איור 1.2. שלושת ההקשרים של פיתוח בר-קיימא.

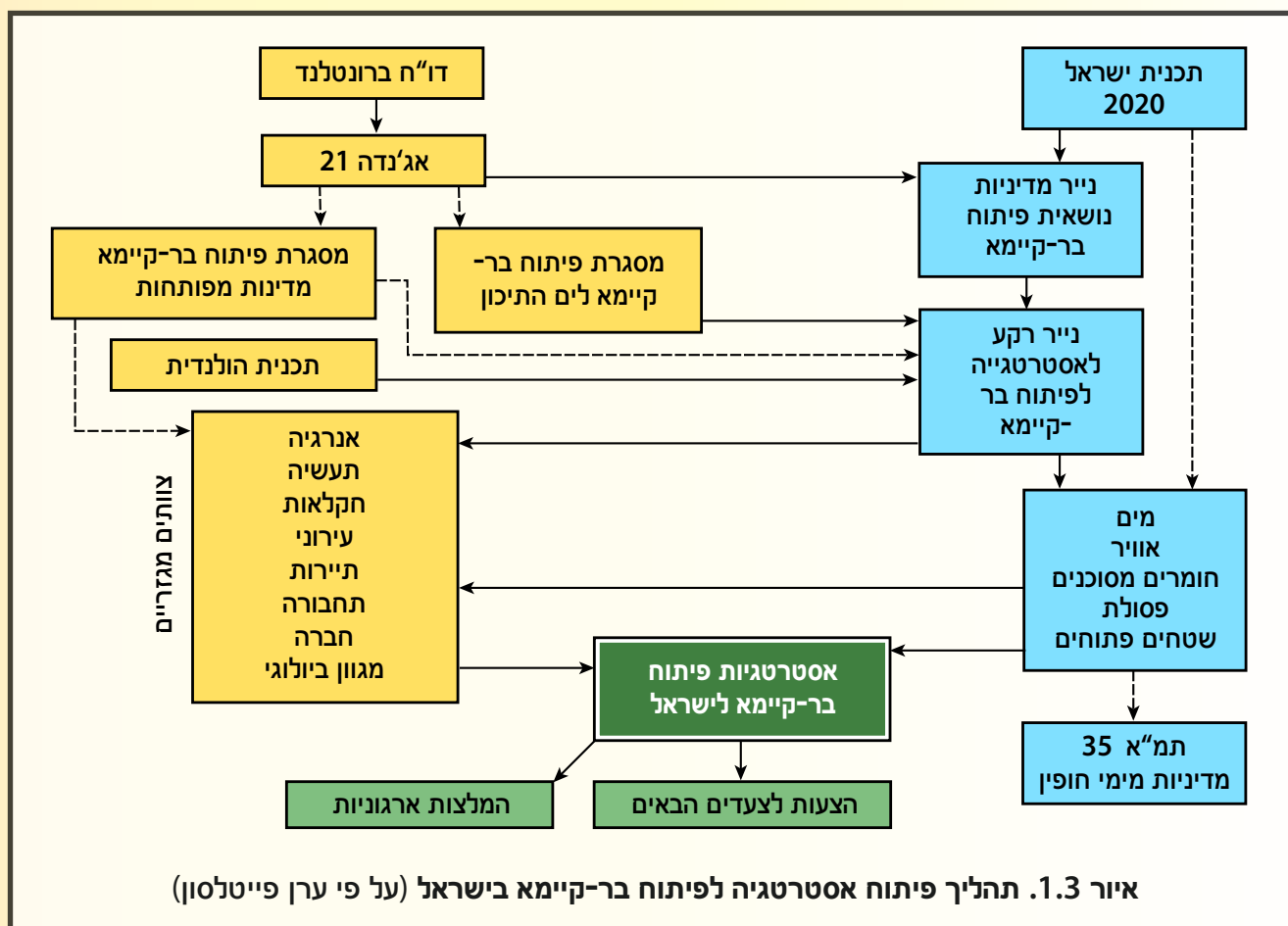
- צורך בצדק חברתי וגוון תרבותי כדי לאפשר לקהילות מקומיות לפתור את העימותים הללו באופן שיביא לידי ביטוי את ערכיהם המיוחדים"

הגדרה זו ניתנת להצגה באופן גרפי על ידי שלושת מעגלי הפיתוח כפי שניתן לראות באיור 1.1. לכל מעגל יש מטרות משלו, ואזורי החפיפה בין כל שני מעגלים מהווים סוגים שונים של פעילויות ותנועות פיתוח ושימור. אולם רק האזור המצומצם יחסית של החפיפה בין שלושת המעגלים מהווה באמת פיתוח בר-קיימא.

ההגדרה השלישית היא:

"פיתוח כלכלי השומר ומקדם את הסביבה תוך כדי שמירה וחיזוק השוויון חברתי."

יש המבקרים את ההגדרה שלעיל, ואת דיאגרמת שלושת המעגלים וטוענים שהשוויון הניתן לשלושת המעגלים מטעה. הוא יוצר את הרושם שהסביבה, הכלכלה והחברה הם שלושה הקשרים שונים ובלתי תלויים שיש למצוא איזון ביניהם. בפועל, כך נטען, הסביבה מהווה את ההקשר והתנאי לקיום החברה האנושית שבמסגרתה יכול להתקיים הפיתוח הכלכלי הדרוש לקיומה ושגשוגה. על כן שמירת הסביבה ופיתוחה באופן ששומר על העושר והמגוון של המערכת האקולוגית חייב להיות בראש סדר העדיפויות, שני בסדר החשיבות הוא קידום השוויון והאיזון החברתי, ומגבלות שתי המערכות האלה צריכות לחול על המערכת הכלכלית. ניתן לייצג הגדרה זו באמצעות סכמת שלושת האליפסות שמוצגת באיור 1.2.



איור 1.3. תהליך פיתוח אסטרטגיה לפיתוח בר-קיימא בישראל (על פי ערן פייטלסון)

3. מדיניות לקידום פיתוח בר-קיימא –

סדר יום 21

אחד המסמכים המרכזיים שאושרו בועידת ריו היה סדר יום עולמי למאה ה - 21 (Agenda 21). מסמך זה קרא למדינות, אזורים, ערים ואף ארגונים להכין סדר יום ליישום מדיניות פיתוח בר-קיימא בתחומי אחריותם. בהקשר העירוני תוכניות אלה נקראות בדרך כלל סדר יום מקומי 21 (סי"מ 21 ובאנגלית LA21). המבנה של סדר יום 21 דומה במידה רבה למבנה הקלאסי של תוכניות פיתוח והוא כולל 5 סעיפים:

- לימוד המצב הקיים
- חזון
- תכנית הפעולה
- מנגנוני היישום
- ניטור, בקרה ולמידה

4. פיתוח בר-קיימא בישראל

בשנת 1996 הוקמו על ידי המשרד לאיכות הסביבה (היום המשרד להגנת הסביבה) קבוצות עבודה של מומחים לגיבוש אסטרטגיה לפיתוח בר-קיימא בשישה סקטורים כלכליים: אנרגיה, תעשייה, תחבורה, תיירות,

ההבדלים העיקריים בין סדר יום מקומי ובין תכניות פיתוח רגילות הם יותר בתכנים מאשר במבנה התכנית. בסדר יום מקומי יושם דגש על פיתוח בר-קיימא, כלומר



לא הופנם הצורך בשינויים מהותיים בפעילות של רוב משרדי הממשלה.

5. תרומתם של בניינים לפיתוח בר-קיימא

בשנים האחרונות החריפה המודעות לשני משברים סביבתיים הקשורים זה בזה. מצד אחד ההתחממות הגלובלית בהשפעת אפקט החממה הנגרם על ידי גידול הריכוז של פחמן דו-חמצני וגזי חממה אחרים באטמוספירה, בעיקר כתוצאה של שריפת דלקים פחמימניים. מנגד, עליית מחירי הדלק מבטאת את הגידול הנמשך בביקוש לאנרגיה, במיוחד עקב התפתחות הכלכלה בסין ובהודו, והעלייה ברמת החיים בהן, הגורמת לביקוש גדל לאנרגיה לייצור חשמל, חימום, קירור ותחבורה. ההשלכות של ההתחממות הגלובלית עלולות להיות הרוות אסון, במיוחד באזורים עירוניים הנמצאים לאורך חופים, ובאזורים חקלאיים העוברים תהליכי מדבור. האדריכל אד מזריע (Ed Mazria), מחלוצי האדריכלות הסולרית בשנות ה-70, חישוב ומצא שההקמה, התפעול והתחזוקה של בניינים אחראיים ל-48% מצריכת האנרגיה בארה"ב (שהיא צרכנית האנרגיה הגדולה ביותר לנפש), ובעולם אחוז זה אף גבוה יותר. אם מסתכלים על צריכת החשמל בלבד, בניינים צורכים 76% מכלל ייצור החשמל. על כן, התאמתם ובנייתם של בניינים כך שיצרכו פחות אנרגיה, תגרום להפחתה משמעותית בצריכת האנרגיה, להקטנת פליטת גזי החממה ומיתון ההתחממות הגלובלית.

בניינים יכולים לתרום לפיתוח בר-קיימא גם באופנים אחרים. מיקום המבנה בסביבה עירונית, במיוחד במקומות נגישים לתחבורה ציבורית יעילה, מאפשרים למשתמשים בו לנהל את חייהם ללא תלות ברכב פרטי, ועל ידי כך לתרום לסביבה הן בהפחתת צריכת האנרגיה, והן בהפחתת פליטת זיהומים ורעש. התקנת אמצעים לחיסכון במים, מיחזור מים אפורים, ועיבוד והחדרת מי הנגר הנוצרים בסביבת הבניין, מאפשרים חיסכון במים וחיסכון באמצעים הנדסיים ואנרגיה הדרושים כדי לטפל בהם. לבסוף, בנייה בצפיפות גבוהה, תוך תרומה ליצירת סביבה עירונית מרובת שימושים ומגוונת ויצירת ממשק נכון עם המרחב הציבורי עשויה לתרום ליצירתה של חברה בריאה, הוגנת ופתוחה.

3. המשרד להגנת הסביבה, 2005

חקלאות ומגזר עירוני. ב-1998 נוספה קבוצה לדין בנושא המגוון הביולוגי ונכתב גם נייר רקע בנושא החברתי. תהליך זה ניזון הן מהתהליכים העולמיים, והן מתהליכי תכנון בישראל שבחנו את עתיד המדינה לטווח ארוך, כמו תכנית אב לישראל 2020 אשר כללה בתוכה מסמכי מדיניות סביבתיים וחברתיים. איור 1.3 מראה את הקשרים השונים בין תכניות בקנה מידה ארצי ומחוזי, מסמכים בינלאומיים ומסגרות בינלאומיות לבין המדיניות המתפתחת בישראל.

בקדימויות שהוגדרו במסגרת האסטרטגיה לפיתוח בר-קיימא בישראל הן:^[3]

- להפנים ההשפעות החיצוניות באופן מלא על ידי תימחור ריאלי;
- חיסכון במשאבי קרקע, מים ואנרגיה;
- פיתוח טכנולוגיות וגישות שיצמצמו או ימנעו פגיעות סביבתיות;
- שיפור איכות החיים בערים;
- הגברת המודעות של הציבור ושל קובעי המדיניות לסוגיות שעניינן איכות הסביבה ומשאבי הטבע;
- הגברת היקף המעורבות הציבורית בנושאים סביבתיים, ובהליכי תכנון במיוחד;
- הגנה על החלשים והרחבת מעגל ההזדמנויות הפתוח בפניהם

בשנת 2001 הוחלט על ייזום תהליכי סי"מ 21 (Local Agenda 21) ברשויות מקומיות בישראל. למרות קשיים ניכרים בגיוס רשויות מקומיות להצטרפות לתהליך על רקע מיעוט המשאבים שהוקצו לפרוייקט, והמשבר הכלכלי ברשויות המקומיות, הצליח הפרוייקט להעלות את רמת המודעות לנושאים סביבתיים ברשויות מקומיות. בשנת 2002, אומץ על ידי הממשלה ופורסם מסמך האסטרטגיה לפיתוח בר-קיימא בישראל, והחלה עבודה על פיתוח מדדים לפיתוח בר-קיימא בישראל שעדיין לא הסתיימה. בשנת 2003, בעקבות ועידת יוהנסבורג לפיתוח וסביבה (10 שנים אחרי ריו), החליטה ממשלת ישראל ליישם מדיניות של פיתוח בר-קיימא בישראל, והטילה על המשרדים השונים, בתיאום ועדת מנכ"לים, להכין תכניות פעולה ליישום. צוותים משרדיים החלו בגיבוש דרכים להפנמת פיתוח בר-קיימא בפעילות כל משרד. לעצם המחויבות הממשלתית ישנה חשיבות, אם כי פעילות מעקב של הארגונים הסביבתיים מראה שלמרות ההצהרות עדיין



2. סביבה, אנרגיה ובנייה ירוקה

בכ-40% מסך כל האנרגיה הנצרכת כיום בארצות מתועשות (ראה איור 2.1) – מבלי להתחשב באנרגיה שהושקעה בבנייתם.

יתר על כן, ככל שמחיר האנרגיה עולה וכך גם הצורך בה (חורפים קרים במיוחד, אירועי חום חריגים בקיץ כגון גל החום הקיצוני שהכה את אירופה בשנת 2003 ובקיץ האחרון), כך נחשפות אוכלוסיות חלשות ועניות ונעשות פגיעות יותר. מצב זה מכונה באנגלית fuel poverty, היינו נזקקות לדלק, ובעוד שבעבר הוא שימש בתיאור הנזקקות לחימום בחורף, בשנים האחרונות הוא משמש גם לתיאור העדר היכולת להשתמש באנרגיה לקירור בקיץ (גם אם עלות רכישה והתקנה של מזגן נמוכה דיה). על כן, שינוי בדפוסי השימוש באנרגיה למיזוג הבניינים מהווה הכרח, ומשמעותו שינוי מהותי בתכנון הבניינים עצמם.

בנייה חוסכת אנרגיה עשויה להוות פתרון המספק נוחות תרמית למשתמש תוך חסכון במקורות אנרגיה מתכלים

ותוך יצירת תנאים לשמירת איכות הסביבה. בנייה זו אינה רק נכונה מבחינה סביבתית, אלא גם אסטרטגיה נכונה יותר ליצירת בניינים נוחים ובריאים יותר, בהם אנו מבלים כ-90% מזמננו! בנוסף לת"י 1045 לבידוד תרמי של בניינים, אושרו בשנים האחרונות ת"י 5281 (בניינים שפגיעתם בסביבה פחותה), וכן ת"י 5282 (דירוג בניינים לפי צריכת אנרגיה). תקנים אלה ותקנים נוספים העוסקים בתאורה, בחומרים ועוד, מהווים בסיס לתכנון ובנייה בני-קיימא וחוסכי אנרגיה. יתר על כן, בבנייני ציבור יש לתכנון בר-קיימא היבטים נוספים: כלכלי, היינו חסכון בתפעול ע"י הרשות המקומית; וחינוכי, היינו חשיפת האוכלוסייה לבנייני ציבור שונים מהמוכרים לה עד כה (בתי ספר, מרכזים קהילתיים, מרפאות ועוד), ובכך הגברת המודעות לפוטנציאל ולהשלכות היומיומיות של בניינים כגון אלה.

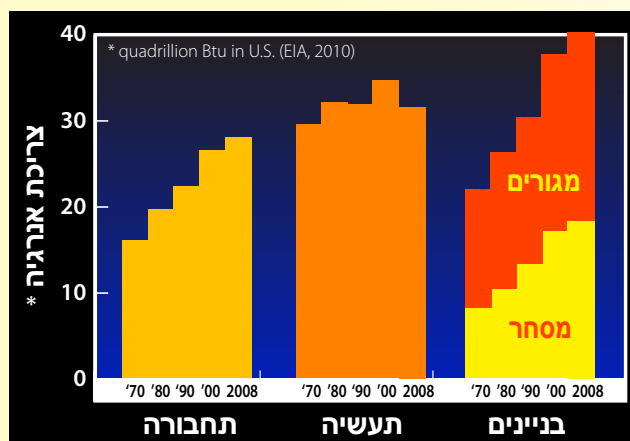
בשנים האחרונות אנו עדים לשיח הולך וגובר אודות בנייה ירוקה ובת-קיימא, בנייה חוסכת אנרגיה, אדריכלות ביו-אקלימית, בנייה אקולוגית, מוטית סביבה, מוטית אקלים, סולרית ומושגים נוספים המבטאים במידה רבה את אותם העקרונות. כולם מתכוונים לבנייה המשלבת הבנה של אילוצי הסובב הטבעי והטמעתם בתכנון, תוך שילוב של אסטרטגיות, חומרים ומערכות היוצרים סביבה מבונה בריאה ונוחה תוך חיסכון בתשומת אנרגיה, מים ומשאבים נוספים.

שאיפתנו ליצור תנאים רצויים בסביבתנו מתבטאת בין היתר בשימוש באמצעים מלאכותיים לבקרת

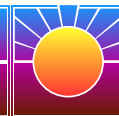
האוויר ומיזוגו, לתאורה ולמערכות נוספות. אמצעים אלה כוללים תנורי חימום למיניהם, מזגני אוויר, מאווררים, מערכות תאורה מלאכותית ועוד. אלה הנם חדשים יחסית – מיזוג האוויר הומצא רק בתחילת המאה ה-20 (1902), ואילו ארובות לתנורי בערה לא נכנסו לשימוש אלא במאות 17-18. במהלך רוב ההיסטוריה של האדם הוא

נדרש להמציא שיטות וכלים אשר אפשרו לו לשפר את תנאי הסביבה שלו. שיטות וכלים אלה היו פשוטים ובמקרים רבים הוזנחו עם כניסתן של מערכות מודרניות לבניינים.

לכך יש מספר השלכות. ראשית, מערכות אלה צורכות אנרגיה שמקורה מתכלה (נפט, גז טבעי ופחם), וכיום ברור כי מקורות מתכלים אלה עומדים להצטמצם בעתיד הקרוב מאוד. כבר היום אנו חשים את השפעותיו הכלליות של צמצום זה. במהלך השנים 2005-2008 עלה מחירה של חבית נפט ביותר מ-300%, מ-\$32 לכ- \$140 ויותר. שנית, צריכת אנרגיה זו המבוססת על בערת אותם דלקים לשם הפקת חשמל, יוצרת בעיות סביבתיות קשות ביותר, המתבטא בין היתר בפגיעה בבריאות הציבור ואף בשינויים האקלימיים להם אנו עדים בעשורים האחרונים. חלקם של הבניינים בצריכת האנרגיה למיזוגם, הארתם והפעלתם מסתכם



איור 2.1. העליה היחסית של צריכת האנרגיה במבנים.



איור 3.1. החלוקה לאזורי אקלים על פי ת"י 1045.

מאזור אקלימי אחד ולהתחשב ברצף העירוני הבנוי, אולם במספר מקרים, כגון חיפה וטבריה, לא ניתן היה להימנע מחלוקת הישוב לשני אזורים.

במסגרת התקן, נקבעה חלוקה לארבעה אזורי אקלים.

4. פורשן א., רובין ש., בנימיני י. ובקר ר., 2000

3. אזורי אקלים

מדינת ישראל קטנה בשטחה. אף על פי כן, תנאי האקלים השוררים בחלקי הארץ השונים נבדלים במאפיינים חשובים. תכנון המתייחס בצורה נאותה לתנאי האקלים השונים עשוי להבטיח כי הסביבה הבנויה תהיה נוחה יותר, אגב חיסכון ניכר באנרגיה. על מנת לסייע לציבור המתכננים להתאים את התכנון לאתר מסוים, ניתן לסווג את כל הישובים בארץ למספר מצומצם יחסית של אזורים בתוכם שוררים תנאים דומים.

את החלוקה לאזורי אקלים ניתן לבסס על משתנים שונים, בהתאם לצרכים. רוב המדדים הנמצאים בשימוש הגיאוגרפים, למשל, מתבססים על היחס בין האידוי לכמות המשקעים, משום שגורמים אלו הם בעלי השפעה מכרעת על התפתחות הצמחייה. כפי שיוסבר בהמשך, החלוקה לאזורי אקלים המיועדת לשימוש המתכננים בתחום הבנייה הסתמכה בעיקר על טמפרטורת האוויר, אף כי גורמים נוספים כגון הלחות וקרינת השמש הם בעלי חשיבות רבה.

1. חלוקה לאזורי אקלים על פי ת"י 1045

בישראל נהוגה בתחום הבנייה חלוקה לאזורים אשר מתבססת על טמפרטורת האוויר בלבד. חלוקה זו נדרשה על מנת לאפשר תכנון מיטבי של כמות הבידוד התרמי הנדרשת בבניינים, בהתייחס להבדל בין הטמפרטורה הפנימית וטמפרטורת הסביבה. המיפוי לאזורים נעשה לראשונה בעת הכנת התקן לבידוד תרמי של בניינים, ת"י 1045, ועבר בחינה מחודשת בשנת 2002. הוא מופיע כעת בת"י 1045, חלק 10, "בידוד תרמי של בניינים: סיווג יישובים לפי אזורי אקלים".

החלוקה לאזורי אקלים נעשתה לפי ניתוח נתונים אקלימיים רב-שנתיים של תחנות מטאורולוגיות^[4]. סיווג היישובים נעשה לפי הטמפרטורה היומית הממוצעת בקיץ ובחורף. ביישובים ללא תחנה מטאורולוגית חושבה הטמפרטורה בעזרת משוואת רגרסיה אשר הביאה בחשבון את השפעתם של פרמטרים גאוגרפיים כגון הגובה מעל פני הים, המרחק מהים והמבנה הטופוגרפי המקומי. נעשה מאמץ למנוע פיצול יישובים ליותר



האזור	התחנה	חורף (ינואר)			קיץ (יולי)		
		טמפ' מיני' יומית ממוצעת [מ"צ]	טמפ' מכס' יומית ממוצעת [מ"צ]	ימי מעלה להסקה ממוצעת [מ"צ * ימים]	טמפ' מיני' יומית ממוצעת [מ"צ]	טמפ' מכס' יומית ממוצעת [מ"צ]	לחות יחסית בשעה 1400 [%]
א	תל אביב	9.0	17.3	541	22.0	28.8	65
ב	באר שבע	6.0	16.4	768	18.5	32.9	32
ג	ירושלים	4.3	11.8	1354	17.2	28.9	42
ד	אילת	9.2	20.8	242	25.2	39.4	15

טבלה 3.1. נתוני אקלים נבחרים מארבע תחנות המייצגות את אזורי האקלים בישראל על פי ת"י 1045. מומלץ לא להסתפק בתיאור זה ולהיעזר בנתונים מפורטים הנמצאים באטלס אקלימי לתכנון פסי וסביבתי בישראל.^[5]

מלבד הבידוד התרמי, נשענת על החלוקה אשר נקבעה בתקן 1045.

2. מאפיינים אקלימיים של אזורי הארץ

כפי שמראה איור 1, החלוקה אשר התקבלה על ידי ניתוח הטמפרטורות יוצרת ארבע רצועות המקבילות בקירוב לחוף הים התיכון ולגב ההר, למעט באזורים אשר בהם האזור ההררי אינו רציף (כגון בגליל התחתון). חלוקה זו אינה מביאה בחשבון מאפיינים אקלימיים אחרים אשר להם עשויה להיות השפעה רבה על תהליך התכנון.

חשיפה לקרינת השמש, ביחוד לקרינה ישירה, עלולה להוות מקור לרווח חום רב בבניין. מאחר וכל שטח המדינה מאופיין בשמיים בהירים במהלך כל הקיץ (למעט עננות בוקר בעיקר ברצועת החוף והשפלה), אין כמעט הבדל בין האזורים השונים במידת החשיפה לקרינת השמש בעונה זו. לא כך הדבר בחורף: כמות

איור 3.1 מראה את החלוקה לאזורי אקלים על פי ת"י 1045. (רשימה מפורטת של היישובים על פי שיוכם לאזורי אקלים מצויה בגוף התקן). הבסיס לחלוקה זו הוא ניתוח השפעות הטמפרטורה של הסביבה על התנאים בתוך הבניין. באזורים א', ב' ו-ג' הקריטריון הקובע את דרישת המינימום להתנגדות תרמית של אלמנטי המעטפת הוא מניעת עיבוי על המשטחים הפנימיים בחורף; לעומת זאת באזור ד', הקריטריון הקובע הוא הקטנת השפעתה של קרינה מהמשטחים בעונה החמה (תוך הנחה שטמפרטורת הפנים המרבית לא צריכה לעלות על 28 מעלות צלסיוס, ושהפרש הטמפרטורות המינימלי בין המשטחים הפנימיים לבין האוויר הפנימי הגורם לקרינת חום מורגשת הוא 3 מעלות).

החלוקה לאזורי אקלים לצורך קביעת בידוד תרמי נעשתה כאמור על סמך פרמטר אקלימי אחד, דהיינו טמפרטורת אוויר, ואיננה מביאה בחשבון גורמים אחרים כגון הלחות באוויר או קרינת שמש, העשויים להיות בעלי השפעה רבה על התכנון. אף על פי כן, גם סדרת התקנים ת"י 5282, "דירוג בניינים לפי צריכת אנרגיה", המבוססים על מאפיינים נוספים של הבניין

5. ביתן ורובין, 1994



העננים פוחתת בהדרגה מצפון לדרום וממזרח לגב ההר, וכמות הקרינה אותה ניתן לנצל לחימום משתנה בהתאם. לדוגמא: אף שמהלך הטמפרטורות האופייני לירושלים ולמצפה רמון דומה, ושתייהן שייכות לאזור ג' לפי ת"י 1045, הרי שבעיירה הדרומית הפוטנציאל לחימום פסיבי בחורף גדול במידה ניכרת.

ללחות באוויר ישנה השפעה רבה על הנוחות התרמית בקיץ: עלייה בלחות גורמת להכבדה בעומס החום גם כאשר טמפרטורת האוויר נותרת ללא שינוי. החלוקה לאזורי אקלים על פי ת"י 1045 אינה מביאה לידי ביטוי הבדלים בלחות, הנגרמים בעיקר כתוצאה מהבדלים במרחק מן הים. לפיכך, יתכן כי בשני ישובים תשרור טמפרטורה דומה, אך ההבדל ביניהם בעומס החום עלול להיות גדול. לדוגמא: בעוד שבבית דגן הלחות היחסית הממוצעת בשעה 14:00 בחודש יולי הינה 54%, הרי שבבאר שבע הינה 32% בלבד.

להלן תיאור מקוצר של התנאים האופייניים לכל אחד מאזורי האקלים על פי תקן 1045. להמחשה ניתן להיעזר גם בטבלה 1, המציגה נתונים חלקיים של ארבע תחנות המייצגות את כל אחד מהאזורים.

2.2 אזור ב – מישור החוף והשפלה; הנגב למעט הר הנגב; העמקים הצפוניים ומקומות אחרים

אזור זה כולל את כל חלקי הארץ אשר גובהם מתחת כ-430 מטר מעל פני הים, למעט רצועת החוף הצרה ואזור הבקעה והערבה. לפיכך התנאים השוררים בו אינם אחידים, וההבדלים בין הגליל התחתון לבין באר שבע, למשל, הם ניכרים. הגבולות בין אזור זה לבין רצועת החוף מצד אחד ואזור ההר מאידך אינם חדים. הגורם העיקרי המעצב את תנאי האקלים באזור זה הוא המרחק מהים, הגורם לכך שהטמפרטורות ביום גבוהות מאלו שלאורך החוף ונמוכות יותר בלילה, בעוד שהלחות באוויר פחותה בהשוואה לאזורים הסמוכים לים.

2.1 אזור א – אזור רצועת החוף

אזור זה כולל רצועה צרה ברוחב של כק"מ מן הים בלבד, המושפעת מן הקרבה הישירה לים (רוחבה של הרצועה הוגדל באופן מלאכותי באזור גוש דן על מנת למנוע חלוקתם של ישובים בין שני אזורי אקלים). הבדלי הטמפרטורה בין יום ללילה ובין קיץ לחורף מתונים באזור זה בשל ההשפעה של הים. הלחות בו גבוהה, כך שגם אם הטמפרטורות בקיץ אינן גבוהות, שורר בו עומס חום כמעט כל שעות היממה. בחורף הדרישה לחימום קטנה.

2.3 אזור ג – אזור ההר

אזור זה מאופיין בתנאים נוחים בקיץ ובדרישה משמעותית להסקה בחורף. בשל הריחוק מהים והגובה הטופוגרפי, טמפרטורת האוויר לרוב נמוכה מזו שבשפלה, וכן גם הלחות באוויר, כך שאין כמעט עומס חום בקיץ.

2.4 אזור ד – בקעת הירדן והערבה

החלק הדרומי של אזור זה, בין ים המלח לים סוף, מאופיין באקלים מדברי חם ויבש,

שמים בהירים כמעט כל השנה וכמות משקעים קטנה מאוד ולא סדירה. בקיץ שורר עומס חום כל שעות היממה, אף שהאוויר יבש מאוד. בחורף מזג האוויר נוח: הטמפרטורות ביום נעימות והדרישה להסקה מינימלית. הרוח באזור זה נושבת כמעט תמיד מצפון או מצפון מזרח.

בחלק הצפוני של האזור, כמות המשקעים עולה בהדרגה מים המלח ועד לכנרת. הטמפרטורות בקיץ גבוהות כמעט כמו בערבה, אך הלחות גבוהה מעט יותר. הטמפרטורות בחורף נמוכות באזור זה ביחס לערבה, אם כי הדרישה לחימום בכל זאת נמוכה.



במבט משכבת הגבול הפנימית, העיר נתפסת כמשטח מחוספס כנייר זכוכית, כאשר הטקסטורה מורכבת מבניינים, עצים ועוד "אלמנטי חספוס".

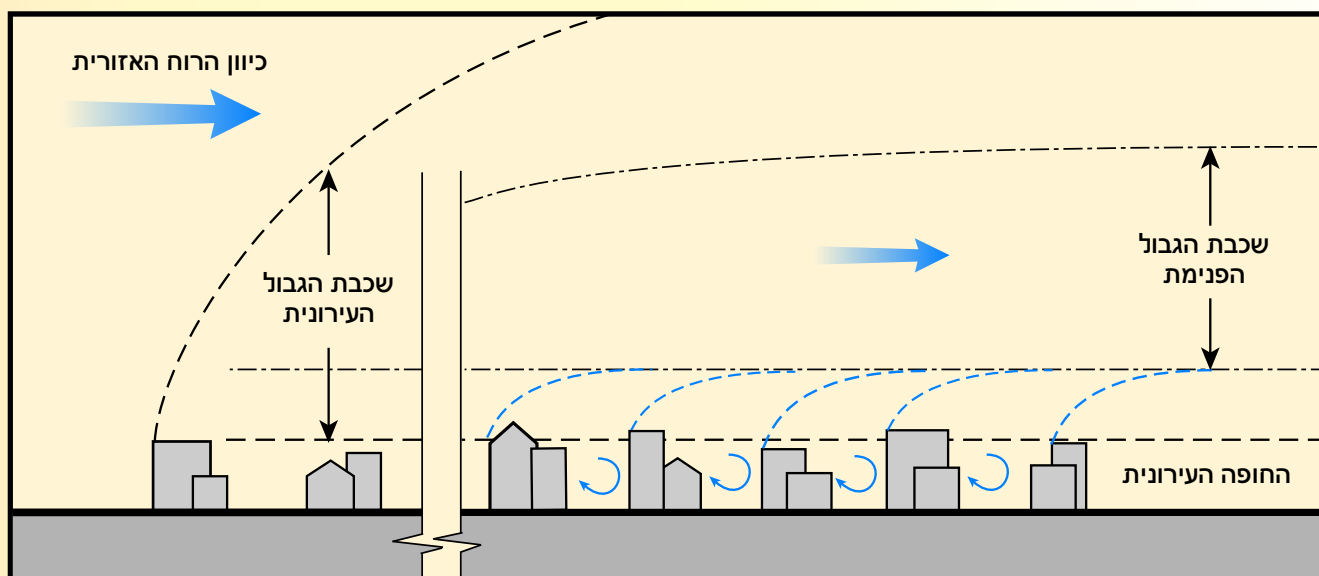
4. אקלים עירוני

עצם קיומו של יישוב עירוני משנה באופן משמעותי את תנאי האקלים – הן בתוך השטח הבנוי והן מעבר לגבולותיו. ההשפעות האקלימיות של המרקם העירוני תלויות במאפיינים רבים, וניתן להעריך אותן ברמות שונות של קנה המידה המרחבי.

1. האקלים בשכבת הגבול

יחסית לקוטרו של כדור הארץ (כ-12,700 ק"מ), עובי האטמוספירה הנו דק מאוד. החלק המושפע מפני הארץ מוגבל לגובה של כ-10 ק"מ, ובמשך פרק

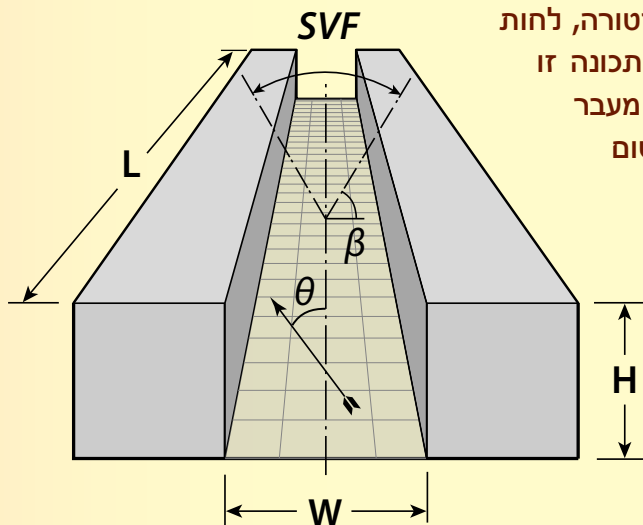
זמן קצר (של ימים בודדים) השפעה זו מוגבלת לשכבה דקה עוד יותר, הנקראת "שכבת הגבול האטמוספרית" (Atmospheric Boundary Layer). באזור עירוני, שכבת הגבול מורכבת משני חלקים שונים: שכבת הגבול העירונית המשתרעת מעל הבניינים, והחופה העירונית המהווה את החלל אשר בין הבניינים.



איור 4.1. מבנה האטמוספירה מעל העיר: שכבת הגבול העירונית מושפעת באופן חלקי מהשטח הבנוי, ושכבת הגבול הפנימית מושפעת מהתכונות הממוצעות של אותו השטח. בחופה העירונית יש השפעות מקומיות של מבנים וכו'.

בתוך שכבת הגבול העירונית יכולה להיווצר שכבת גבול פנימית (Surface Layer) אשר בתוכה התנאים מעוצבים על ידי התכונות הכלליות של המשטח העירוני המחוספס. לכן הצפיפות של הבניינים, גובהם והחומרים שלהם מוצאים ביטוי בשכבה זו, אם כי לא ניתן להבחין בהשפעתם של מבנים בודדים. בכל

• **שכבת הגבול העירונית (Urban Boundary Layer)** מוגדרת כאותו חלק מן האטמוספירה אשר מושפע מקיומו של השטח הבנוי: עובייה של שכבת אוויר זו נוטה לעלות מעל העיר לגובה של בערך פי 10 מגובה המבנים. השפעת העיר מורגשת גם מעבר לגבולותיה, בעיקר בכיוון מורד הרוח (ראה איור 4.1).



איור 4.2. המדדים הצורניים הבסיסיים של המרקם העירוני, כפי שמתבטאים ב"קניון העירוני".

3) גזרת החשיפה לשמיים (Sky View Factor - SVF) – נמדד כחלק היחסי של כיפת השמיים ה"נראה" מנקודה נתונה בתוך החלל. עבור קניון פשוט, ערך ה-SVF מחושב יחסית לנקודה בציר המרכזי של הרחוב, במפלס הרצפה:

$$SVF = \cos \beta$$

$$\beta = \tan^{-1}(H / 0.5W)$$

מעבר למדדים הבסיסים האלה, יש מדדים נוספים:

צפיפות חזיתית (Frontal Area Density) – היחס בין שטח החזיתות האנכיות המופנות לכיוון הרוח, לשטח האופקי הכולל;

צפיפות שטח גגות (Roof Area Density) – היחס בין שטח הגגות לשטח האופקי הכולל;

יחס מגוון (Vegetated Fraction) – היחס בין שטח התכסית הצמחית לשטח האופקי הכולל.

ראוי לציין שכל המדדים האלה הנם מדדים גיאומטריים, להבדיל ממדדי צפיפות אחרים כגון מספר יחידות דיור או מספר תושבים ליחידת שטח, הקשורים לתופעות אקלימיות רק באופן עקיף.

3. אי החום העירוני

מחקרים רבים הראו שבנייה עירונית גורמת לטמפרטורת אוויר גבוהות בעיר יחסית לאלה שבסביבה הבלתי-בנויה.

גובה נתון בתוך השכבה, התנאים הנמדדים (כגון טמפרטורה, לחות או מהירות רוח) נוטים להיות אחידים יחסית במרחב, ותכונה זו של הומוגניות מאפשרת תאור כללי של האקלים העירוני. מעבר החום בין העיר והאטמוספירה ניתן למדידה בשכבה זו משום שכל מעברי האנרגיה (קרינה מהשמש ומהקרקע, והסעת חום ואדי מים) מאופיינים כשטפים אנכיים אשר ערכם יחסית אחיד בכל השכבה.

הגבול העליון של השכבה עולה בכיוון הרוח, בדרך כלל עד לגובה של פי 4-5 מהגובה הממוצע של הבניינים, ומעל גבול זה ישנן השפעות משולבות של השטח הבנוי והלא בנוי. הגבול התחתון נמצא בגובה של בערך פי-2 מגובה הבניינים, ומתחת לגבול זה ישנן השפעות של מבנים בודדים – כך שבקרבת הגגות, מדדים כגון מהירות הרוח משתנים מנקודה לנקודה.

• **החופה העירונית (Urban Canopy Layer)** מוגדרת כשכבת האטמוספירה בין פני הקרקע לבין גובהם העליון של הבניינים באזור עירוני. בניגוד לשכבת הגבול הפנימית שנמצאת מעל העיר, הטווח של ה"חופה" מתאפיין בתנאי אקלים מאוד לא אחידים, אשר בכל נקודה מושפעים מהסביבה הקרובה ביותר. לכן בכל חלל עירוני נוצר "מיקרו-אקלים" ייחודי, בהתאם לתכונותיהם המקומיות של הבניינים והפיתוח הסובבים אותם, יחד עם השפעות של האקלים האזורי והעירוני.

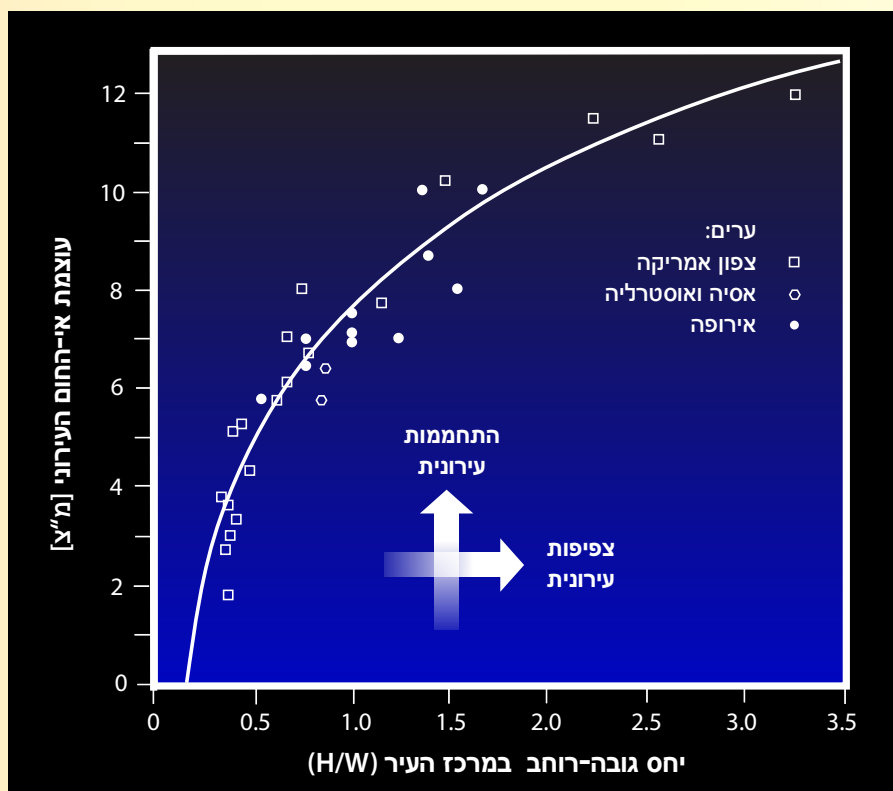
2. תכונות צורניות של המרקם העירוני

למרות שהחופה העירונית נוטה להיות מאוד הטרוגנית, ישנם מספר מדדים לתיאור הצפיפות ותכונות גיאומטריות אחרות שלה.

ה"קניון העירוני" (urban canyon) מוגדר כחלל עירוני תלת-ממדי ליניארי, כדוגמת רחוב ארוך שתחום בשני צדדיו ע"י בניינים רצופים. המודל של קניון עירוני מאפשר תאור כמותי של צורת הבנייה העירונית, באמצעות שלושה מדדים:

(1) יחס גובה-רוחב (H/W) – נמדד כגובה הבנייה הממוצע (H), יחסית לרוחבו של חלל הרחוב בין קירות המבנים (W);

(2) הפנייה – כיוון הציר העיקרי של הרחוב, שנמדדת במעלות מכיוון צפון;



איור 4.3. התלות של עוצמת "אי החום העירוני" (הפרש הטמפרטורה בין מרכז העיר לסביבה מחוץ לעיר) בצפיפות התלת-מימדית של הבניה העירונית.^[6]

משטחים: גוונים כהים גורמים לבליעה מוגברת של קרינת שמש, והשימוש בחומרים בעלי מקדם החזרה (albedo) יותר גבוה עשוי להקטין את כמות החום הנאגרת בעיר. דוגמאות לגישה זו כוללות גגות צבועים בגוונים בהירים וחומרים חליפיים לסלילת כבישים אשר צבעם יותר בהיר מאספלט. (עם זאת, יש לזכור שחומרי גמר לריצוף וקירות חוץ בגוונים בהירים מאוד עלולים ליצור בוקה בעייתי בשטחים הפתוחים).

(3) אטימות השטח העירוני – הכיסוי הירוק האופייני, שקיים בשטח הלא מבונה מחוץ לעיר, גורם לקירור האוויר באמצעות אידוי מים מהקרקע ודיות מעלי הצמחים (evapo-transpiration). לרוב הפוטנציאל לקירור באידוי נמוך בשטח עירוני, כתוצאה מהחלפת התכסית הירוקה בחומרים אטומים כגון בטון ואספלט. ככל שניקוז מי הגשם יעיל יותר, כך קטן האידוי מפני השטח – וככל שהעיר מתאפיינת במיעוט צמחים, כך קטן שיעור הטרנספירציה. לכן יש תפקיד חשוב ליעור עירוני, אשר כולל גנים ציבוריים ופרטיים, וגם

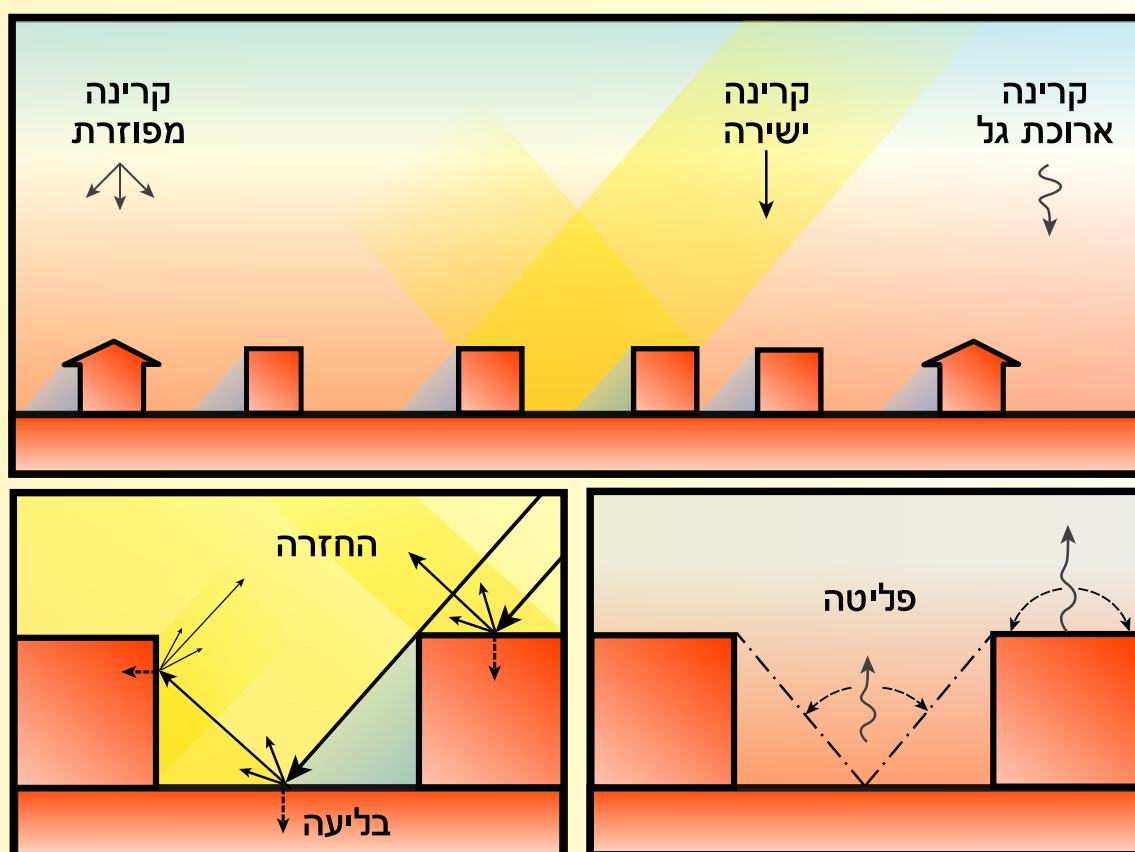
התחממות זו נתפסת בצורה של "אי חום" – כלומר, כתם חם בתוך המרחב. אבל בפועל, כתם חום בצורת אי ניתן למדידה בעיקר מעל העיר, בשכבת הגבול העירונית, כאשר בתוך המרקם הבנוי (כלומר בחופה העירונית) עוצמת ההתחממות אינה אחידה ומשתנה בהתאם לתכונות הסביבה המיידית.^[6]

ישנם מספר תהליכים שגורמים להיווצרות אי החום העירוני, ולחלק מהם יש גם זיקה לתכנון עירוני פיזי:

(1) ייצור חום מפעילות אנושית (anthropogenic heat) – כל תהליכי הבעירה המתבצעים בעיר יוצרים חום – בתנורי חימום של בניינים, במנועים של כלי רכב, במכונות של מפעלי תעשייה, ועוד. (פעילות עירונית יוצרת גם זיהום אוויר, והפליטה המוגברת של קרינה מהשמיים שנובעת מהריכוז המוגבר של מזהמים שונים נחשבת כגורם אפשרי נוסף להיווצרות אי החום). בנוסף, נפלט חום לסביבה העירונית ממערכות מיזוג אוויר, כך שתוך כדי קירור של חללים פנימיים, מתחמם האוויר בשטחי חוץ בעונה החמה. שיעור יצירת החום תלוי, אם כן, בתכנון אדריכלי (שמשפיע על הצורך בחימום וקירור של מבנים), ובתכנון עירוני (שמשפיע על הצורך בתחבורה עירונית).

(2) תכונות תרמיות של חומרי בנייה עירוניים – יחסית לשטח הפתוח הירוק, התכסית העירונית מורכבת מחומרים צפופים כגון בטון ואספלט, אשר מתאפיינים בקיבול חום גבוה. קיבול החום הגבוה של מבנים ושטחים מרוצפים או סלולים גורם לכך שאנרגיית שמש שנקלטת ביום נאגרת לאורך זמן, ובליילה האוויר העירוני בא במגע עם משטחים חמים יחסית, כך שהטמפרטורה שלו גבוהה ביחס לסביבה הפתוחה. עוצמת ההתחממות אשר נגרמת ע"י חומרים עירוניים תלויה במידה רבה בצבע של אותם

6. Oke, 1987



איור 4.4. חימום קרינתי והצורה התלת-מימדית של הבניה העירונית.

כללי (urban albedo) נמוך יחסית באזורים צפופים, ויוצרת מעין "מלכודת חום קרינתית" בתוך החלל. (חשוב לציין שבגלל קיבול החום הגבוה האופייני לחומרים עירוניים, חלק מאנרגיית השמש הנלכדת נאגר לאורך זמן, ונפלט כקרינה ארוכת-גלים).

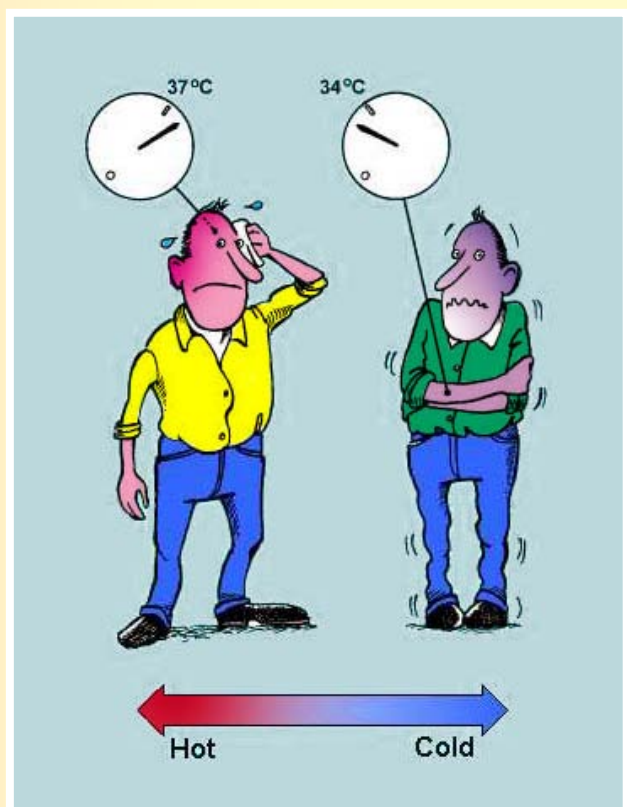
- מלכודת הקרינה נוצרת בחללים צפופים גם כתוצאה מצמצום החשיפה לשמיים (SVF נמוך) – משום שחלק מהקרינה ארוכת-הגלים (חום) שנפלטת מהמשטחים כלפי השמיים נבלעת ע"י משטחים אחרים. תופעה זו באה לידי ביטוי במיוחד בלילה, כאשר המאזן הקרינתי הטבעי הנו "שלילי" (דהיינו השטף העיקרי מכון מפני השטח אל השמיים).

- השלכה אפשרית נוספת של בנייה צפופה הנה חוסר אוורור, שמגביל את סילוק החום מהחלל ע"י הרוח. זרימת האוויר בחופה העירונית מושפעת מגורמים רבים, וסילוק החום תלוי גם במהירות הרוח (שהיא בדרך כלל נמוכה בתוך קניון עמוק), וגם בעצמת הערבול של הזרימה (turbulence) – אשר, עד גבול מסוים, מתגברת עם ציפוף הבנייה.

עצי רחוב – אשר חוסמים את קרינת השמש ומפזרים את האנרגיה בצורת חום כמוס במקום חום מוחשי. אמצעי נוסף למניעת התחממות בערים צפופות הנו "הגג הירוק", אשר כולל שכבת אדמה רטובה וכיסוי צמחיה על גבי גגותיהם של המבנים.

4) הגיאומטריה העירונית – תופעת "אי החום" מושפעת באופן מובהק גם מהתכונות הגיאומטריות של המרקם העירוני המחוספס, שבתוך החופה מתבטאות בצורת המבנים והחללים ביניהם. כאשר הבנייה צפופה והרחובות מתאפיינים ביחס H/W גבוה, ניתן להבחין במספר תופעות:

- פני הרחובות והבניינים בולעים חלק מקרינת השמש הפוגעת בהם, ומתחממים, בעוד שחלק מהקרינה מוחזר. החלק היחסי אשר מוחזר תלוי בצבע המשטחים (משטחים כהים בולעים יותר קרינה) ובמידת החספוס שלהם (משטחים מחוספסים מחזירים פחות קרינה). בחלל צר ועמוק ישנן החזרות קרינה רבות בין המשטחים שונים, וכתוצאה מכך נבלע אחוז יחסית גבוה מהקרינה. תופעה זו מתבטאת במקדם החזרה



5. נוחות תרמית

האדם שאף תמיד ליצור לעצמו סביבה נוחה מבחינה תרמית. הדבר בא לידי ביטוי במסורות בנייה בכל רחבי העולם – מן העת העתיקה ועד לימינו אלה. מהי אפוא 'נוחות תרמית', וכיצד ניתן ליצור סביבה שבה היא מתקיימת?

1. הגדרה

"נוחות תרמית היא מצב נפשי אשר בו מורגשת שביעות רצון מהסביבה התרמית." (ISO 7730).

מן ההגדרה משתמע שנוחות תרמית היא עניין סובייקטיבי, ואכן כך הוא. לא כל בני האדם שווים, ואנשים שונים עשויים להביע דעות מגוונות באשר למידת הנוחות שהם חשים בסביבה נתונה. עם זאת, מחקרים רבים שנעשו בכל רחבי העולם במשך השנים מראים שמבחינה סטטיסטית, רוב האנשים חשים בנוח בתנאים דומים, וכי ניתן לאפיין סביבה אשר מרבית בני האדם יחוש בה בנוח.

2. חשיבות הנוחות התרמית

נוחות תרמית היא אחד הגורמים המשפיעים על איכות הסביבה בה אנו חיים, יחד עם איכות האוויר, תנאי התאורה ורמת הרעש. מחקרים מראים שכאשר הסביבה בה אנו עובדים אינה נוחה, עלולה התפוקה לרדת במידה ניכרת. אחד מן היעדים העיקריים של הבניין הוא אפוא ליצור מסגרת פיסית התוחמת חלק מן המרחב שבו התנאים הסביבתיים כגון טמפרטורת האוויר או מידת החשיפה לקרינת שמש שונים מאלו המתקיימים מחוץ לבניין.

3. מאזן האנרגיה בגוף האדם

נוחות תרמית מתקיימת כאשר חילוף האנרגיה בין הגוף וסביבתו נמצא במצב של שיווי משקל. כלומר, החום שהגוף מייצר תוך כדי תפקודו (פעילות מטבולית) שווה בדיוק למאזן האנרגיה עם הסביבה. קיימים מספר מנגנונים לחילוף אנרגיה בין הגוף והסביבה:

3.1 קרינה

גוף האדם פולט כל העת אנרגיה אל הסביבה באמצעות קרינה בגלים ארוכים. (קרינה בגלים ארוכים נפלטת מגופים קרים באופן יחסי, לרבות כל העצמים על פני כדור הארץ). במקביל, קולט גוף האדם אנרגיה בגלים ארוכים מן הסביבה, אף זו ללא הפסקה. בשעות היום, קולט גוף האדם גם קרינת שמש (קרינה בגלים קצרים), בין אם הוא חשוף לה ישירות ובין אם היא מוחזרת מעצמים אחרים (קרינה מוחזרת) או מכיפת השמיים (קרינה מפוזרת). מאזן הקרינה עשוי לפיכך להיות חיובי, כאשר גוף האדם מרוויח יותר אנרגיה בקרינה מכפי שהוא מאבד אל הסביבה, או שלילי, כאשר קצב האיבוד עולה על קצב הקליטה.

3.2 הסעה

גוף האדם מחליף אנרגיה עם האוויר שסביבו באמצעות הסעה. כאשר טמפרטורת האוויר נמוכה מטמפרטורת העור, הגוף מאבד אנרגיה. לעומת זאת, כאשר האוויר חם יותר מהעור, הגוף מתחמם כתוצאה מהמגע עם האוויר. כאשר ישנה תנועת אוויר – רוח – גדל קצב חילוף האנרגיה עם הסביבה, והגוף מתחמם או מתקרר יותר מהר.



3.3 נידוף זיעה

כאשר טמפרטורת העור גבוהה מן הרצוי, מפרישות בלוטות הזיעה נוזל, אשר תהליך האידיוי שלו סופח אנרגיה מן הגוף (וגם מן הסביבה) ומביא לירידה מקומית של טמפרטורת העור. קצב האידיוי תלוי בטמפרטורת האוויר בסביבה, בלחות האוויר ובתנועה יחסית בין האוויר לבין הגוף (לרוב – רוח). ככל שהאוויר חם יותר ויבש יותר, וככל שמהירות תנועת האוויר גדולה יותר – כך יגדל קצב האידיוי וקירור העור יהיה יעיל יותר.

3.4 עבודה

כאשר אנו מבצעים עבודה (במובן הפיסיקלי – הפעלת כוח לאורך מרחק), הגוף צורך אנרגיה. בבואנו לנסח את מאזן האנרגיה של הגוף, יש אפוא להביא בחשבון גם אנרגיה זו.

כאשר מאזן האנרגיה של הגוף עם הסביבה הוא נייטרלי, מתקיים השוויון הבא:

$$M - W = E + D_C + D_R$$

שבו M היא הפעילות המטבולית, W העבודה אותה אנו מבצעים, E איבוד האנרגיה באמצעות נידוף זיעה, D_C מאזן חילוף החום בהסעה ו- D_R מאזן חילוף החום בקרינה.

4. וויסות טמפרטורת הגוף

לאדם, כמו לשאר היונקים, מנגנון וויסות יעיל, השומר על טמפרטורה פנימית קבועה של כ-37 מעלות.

כאשר הגוף מתחמם, נכנסים לפעולה שני מנגנוני צינון:

- התרחבות כלי הדם, ואיתה עלייה בקצב זרימת הדם
- הפרשת זיעה

כאשר הגוף מתקרר, פועלים שני מנגנוני חימום:

- היצרות של כלי הדם, הגורמת לקצב זרימת הדם לרדת
- הגדלת ייצור האנרגיה הפנימי בגוף על ידי צמרמורת (רעידת שרירים)

חשוב לציין שתגובת הגוף למצבי חום או קור אינה

רצונית: מנגנוני ווסות הטמפרטורה ימשיכו בפעולתם כל עוד לא יהיה שינוי בתנאים הסביבתיים.

ניתן אפוא להגדיר נוחות תרמית תוך התייחסות לתפקודים הפיסיולוגיים של גוף האדם: "נוחות תרמית היא מצב שבו טמפרטורת הגוף קבועה בתחום שבין 36.5 ו-37.5 מעלות צלזיוס, הטמפרטורה הממוצעת של העור היא 33-35 מעלות, השרירים אינם מצטמררים והגוף אינו מזיע". ראוי לשים לב כי הגדרה זו אינה מציינת מהם התנאים הסביבתיים בהם היא מתקיימת ואינה מעידה דבר על המצב הנפשי של האדם.

5. גורמים משפיעים על נוחות תרמית

הנוחות התרמית מושפעת משתי קבוצות של גורמים: גורמים סביבתיים וגורמים אישיים. מידת הנוחות שאנו חשים היא פועל יוצא של ההשפעה המשולבת של כל הגורמים האלה.

5.1 גורמים סביבתיים

- טמפרטורת האוויר משפיעה על חילוף האנרגיה בין האדם וסביבתו בהסעה ובאידיוי זיעה.
- לחות האוויר משפיעה על יכולתו של הגוף לנדף זיעה: ככל שהאוויר לח יותר, כך קטן קצב אידיוי הזיעה ואיתו יעילות צינון הגוף.
- מאזן הקרינה מושפע בעיקר, אך לא רק, מחשיפה לשמש.
- תנועת רוח מגדילה את קצב חילוף האנרגיה בין הגוף והסביבה בהסעה, ובמקביל מגדילה את קצב אידיוי הזיעה

5.2 גורמים אישיים

- פעילות גופנית משפיעה על קצב חילוף החומרים (מטבוליזם), אותו מקובל למדוד ביחידות "met".
(1 met = 58.15 וואט/מ"ר של שטח פני הגוף)
- לבוש יוצר שכבת חיץ המבודדת במידה מסוימת את הגוף מסביבתו. את מידת הבידוד אותו יוצרים הבגדים מודדים ביחידות "clo".
(1 clo = 0.155 מ"ר/מ"צ וואט)



קצב חילוף חומרים		פעילות
met	וואט/מ"ר	
0.8	45	שינה
1.0	58	ישיבה נינוחה
1.2	70	עבודה משרדית
1.6	95	הוראה
1.9	110	הליכה במישור (2 קמ"ש)

טבלה 5.1. קצב חילוף החומרים בפעילות גופנית שונה אצל אדם ממוצע.

5.3 השפעת מאפיינים אישיים כגון מגדר, גיל, או שיוך גזעי על הנוחות התרמית

מחקרים רבים בתנאים מבוקרים, בהם הנבדקים לבושים בגדים אחידים וחשופים לתנאים סביבתיים זהים, מראים כי למאפיינים אישיים כגון מגדר, גיל או גזע אין שום השפעה על ההעדפות התרמיות. נמצא כי ישנם הבדלים ניכרים בין נבדקים שונים המשתייכים לאותה תת-קבוצה (כגון נשים), אולם לא נמצא הבדלים בין הקבוצות.

את ההבדלים בין ההעדפות התרמיות של בני אדם המשתייכים לאותה קבוצה ניתן לייחס בין היתר לשוני ביחס בין נפח הגוף לשטח הפנים שלו ולכמות שומן תת-עורי שונה: אלו משפיעים על שטח החום בין פנים הגוף לבין הסביבה, דרך מעטפת הגוף.

ההסבר לדעה הרווחת המייחסת העדפות שונות לבני קבוצות שונות טמון ככל הנראה באקלים, בהבדלים במאפייני הלבוש או ברמת פעילות גופנית שונה.

6. גישות להערכת הנוחות התרמית

הנוחות התרמית היא כאמור עניין אישי, אך בשל הצורך לתת בידי מתכנני הבניין הנחיות מעשיות, נערכו במשך השנים מחקרים רבים אשר מטרתם היתה לקבוע מדדים כמותיים מדויקים. המחקרים הונחו על ידי שתי גישות שונות:

- הגישה הפיסיולוגית - מאחר ונוחות תרמית יכולה להתקיים רק כאשר חילוף האנרגיה בין הגוף וסביבתו נמצא במצב של שיווי משקל, ניתן לחשב מהם התנאים הסביבתיים הדרושים להבטיח שיווי משקל זה עבור כל שילוב נתון של לבוש ופעילות גופנית.

- הגישה ההתנהגותית - המחקרים אשר נערכו על פי גישה זו התבססו על שאלונים בהם התבקשו הנבדקים להעריך את מידת הנוחות התרמית שלהם, במקביל לרישום התנאים הסביבתיים.

- הבדלים בין הגישות - בעוד שבגישה הראשונה חוקרים רשמו את תגובות הנבדקים בתאים אקלימיים בהם ניתן היה לשלוט על התנאים הסביבתיים באופן מבוקר, התמקדה הקבוצה השנייה ברישום תגובות הנבדקים בסביבתם הטבעית (כגון במקומות העבודה או בבית). למרבה ההפתעה, תוצאות המחקרים בשתי הגישות שונות במידה משמעותית. בעוד שהנבדקים אשר שהו בתנאים מבוקרים ציינו כי הם חשים בנוח בתחום טמפרטורות צר יחסית, הרי שהנבדקים אשר שהו בסביבתם הטבעית חשו בנוח בתנאים סביבתיים מגוונים, אשר היו לעתים חמים או קרים בהרבה מן התחום הצר אשר נמצא בתאים המבוקרים. ההבדל בתוצאות מוסבר בכך שמחקרי השדה משקפים את מכלול התנאים המשפיעים על בני האדם, לרבות הבדלים בסוג הלבוש ובאופי הפעילות, בעוד שהמחקרים המבוקרים בדרך כלל שאפו לנטרל את השפעתם של גורמים התנהגותיים.



רמת הבידוד		סוג הבגד
clo	מ"ר/מ"צ וואט	
0.06	0.009	מכנסיים קצרים
0.09	0.014	חולצה (שרוול קצר)
0.25	0.039	חולצה (שרוול ארוך)
0.25	0.039	מכנסיים
0.35	0.054	סוודר
0.35	0.054	ז'קט
0.70	0.109	מעיל עליון

טבלה 5.2. רמת הבידוד התרמי אשר מספקים בגדים שונים.

7. אקלום

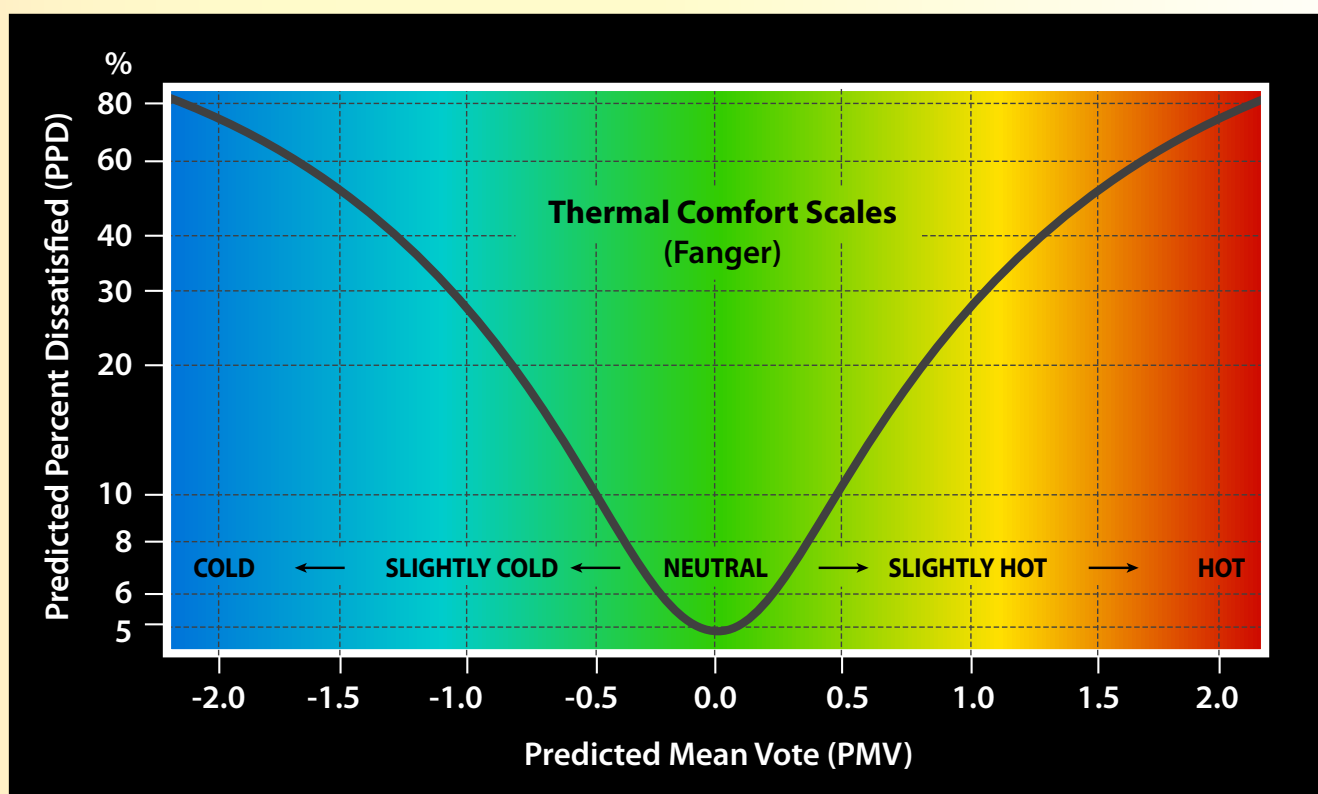
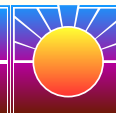
תהליך התאמת המנגנונים השונים של גוף האדם לתנאי אקלים חדשים מכונה אקלום. תהליך האקלום עשוי להמשך כשלושה שבועות, אך התאמה חלקית לתנאים סביבתיים מושגת תוך ימים אחדים.

השפעת האקלום על ההעדפות התרמיות של אנשים עשויה להיות ניכרת. מחקרי שדה רבים הראו קשר ברור בין טמפרטורת האוויר אליה נחשפו הנבדקים לאורך תקופה ארוכה לבין ההעדפות התרמיות שלהם. ככל שטמפרטורת האוויר הממוצעת היתה גבוהה יותר, כך עלתה גם הטמפרטורה אותה ציינו הנבדקים כטמפרטורה הרצויה להם. נמצא גם כי ניתן ליחס את תהליך האקלום הן להתאמה לטמפרטורה אשר שררה בתוך הבניינים בהם שהו הנבדקים, והן לטמפרטורה החודשית הממוצעת של הסביבה.

המשמעות המעשית של ממצאים אלה היא כי בבניינים בהם מותקנות מערכות בקרת אקלים (צינון וחימום) יש להתאים את התנאים המתוכננים לתנאים הסביבתיים אליהם חשופים המשתמשים, בהתאם לעונות השנה ולאקלים השורר במקום. מדיניות כזו תבטיח לא רק התאמה טובה יותר להעדפות המשתמשים אלה גם חיסכון ניכר באנרגיה.

8. שיטות להערכת תנאי הנוחות

על פי הגישה הפיסיולוגית, נוחות תרמית אפשרית רק כאשר מאזן האנרגיה של הגוף הינו ניטרלי. עם זאת, גם מחקרים בתנאים מבוקרים מראים כי ישנה שונות מסוימת בין בני האדם, ותגובותיהם לתנאים נתונים אינן זהות לגמרי. על מנת להציג את הקשר בין מכלול התנאים הסביבתיים והאישיים לבין ההעדפות התרמיות של בני האדם, פותח על ידי חוקר בשם Fanger סולם פשוט בן חמש דרגות, אשר על פיהן ניתן לתאר את תחושת הנבדק ביחס לתנאים התרמיים בעזרת ציונים מספריים הנעים בין מינוס שתיים לפלוס שתיים: לתחושה ניטרלית ניתן הציון '0', בעוד סביבה חמה מתוארת על ידי ציונים חיוביים וסביבה קרה על ידי ציונים שליליים. באמצעות מאזן אנרגיה מפורט של גוף האדם ניתן לחזות מה יהיה הציון הממוצע שיתקבל כאשר קבוצה של נשאלים תתבקש להעריך את התנאים התרמיים על פי סולם זה (PMV - predicted mean vote). סדרה של מבדקים בתנאי ניסוי מבוקרים הניבו קשר סטטיסטי בין מאזן האנרגיה לבין הציון החזוי הממוצע, שעל פיו ניתן לחזות מה יהיה שיעור הנבדקים אשר יביעו אי-שביעות רצון מהתנאים הנתונים (PPD - percent predicted dissatisfied).



איור 5.1. הקשר בין הקשר בין הציון החזוי הממוצע לבין שיעור הבלתי מרוצים.

(או קטן במיוחד). במצבים מעין אלה אין מנוס מעריכת מאזן אנרגיה מלא.

8.1 אמצעים גרפיים

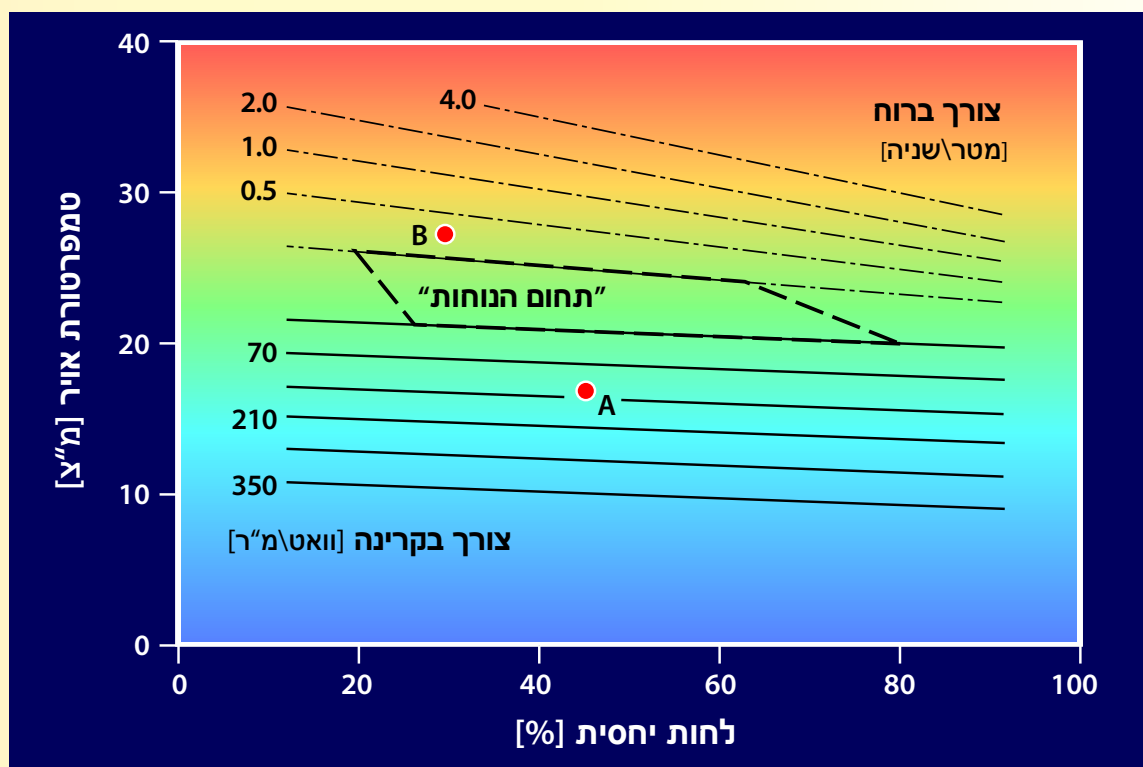
המפה הביו-אקלימית

המפה הביו-אקלימית היא תרשים המתאר את ארבעת הגורמים הסביבתיים המשפיעים על הנוחות התרמית: טמפרטורת האוויר, לחות האוויר, מהירות תנועת האוויר ומאזן הקרינה. המפה הביו-אקלימית המובאת כאן (איור 5.2) מתייחסת לרמת ביגוד 0.8 clo (ביגוד חורפי קל) ורמת פעילות 1.3 met (כגון עבודה משרדית).

הציר האופקי של התרשים מבטא את השפעת הלחות על הנוחות התרמית באמצעות הלחות היחסית. הציר האנכי של הגרף מבטא את ההשפעה של טמפרטורת האוויר. כל נקודה על הגרף מתארת אפוא צירוף ייחודי של טמפרטורה ולחות של האוויר. תחום הנוחות מתואר על ידי האזור המקווקו, אשר נקבע בהנחה שהאוויר אינו נמצא בתנועה ושמאזן הקרינה הוא נייטרלי. ניתן להרחיב את תחום הנוחות גם לטמפרטורות אוויר

איור 5.1 מציג את העקומה המתארת את הקשר בין הציון החזוי הממוצע לבין שיעור הבלתי מרוצים. חשוב להדגיש כי גם בתנאים האופטימליים יחושו כחמישה אחוזים בממוצע מן האוכלוסייה שלא בנוח, מן הבחינה התרמית.

חישוב מאזן האנרגיה על פי שיטתו של Fanger מאפשר לתת ציון לכל שילוב אפשרי של תנאים סביבתיים ואישיים, אך הוא מסובך מאוד ואינו מתאים לשימוש יום-יומי מעשי. במשך השנים פותחו אפוא מדדים שונים ומספר שיטות גרפיות שמטרתם לתאר את תחום הנוחות התרמית באופן פשוט יותר. בכדי להפחית את מידת המורכבות של הבעיה, כל השיטות מתייחסות לערכים נתונים של הגורמים האישיים (בדרך כלל פעילות מטבולית מתונה ולבוש קל) ומתמקדות במיפוי הגורמים הסביבתיים בלבד. חשוב להבין, אפוא, כי השיטות המוצגות להלן מיועדות בעיקר לסייע למתכנן לנתח את השפעת תנאי הסביבה על הנוחות התרמית של בני אדם העסוקים בפעילות יום-יומית רגילה. הן אינן מתאימות לתיאור התנאים הסביבתיים אשר יביאו לנוחות תרמית במקרה של פעילות גופנית מאומצת או היקף לבוש כבד במיוחד



איור 5.2. המפה הביו-אקלימית, עם סימון של תנאי נוחות שונים.

על גבי הטבלה הפסיכרומטרית ניתן לסמן תחום נוחות המתייחס לערכים ידועים של מאזן הקרינה ותנועת האוויר, בנוסף לגורמים האישיים (ביגוד ורמת פעילות גופנית).

הטבלה הפסיכרומטרית הבסיסית אינה מאפשרת להציג את השפעת הקרינה על הנוחות התרמית. לשם כך משתמשים בגרסא מיוחדת של הטבלה, שבה מוצגת הטמפרטורה האפקטיבית החדשה במקום טמפרטורת הגולה היבשה בציר האופקי.

8.2 מדדים מספריים

מדד עומס חום

מדד עומס החום מבטא באופן כמותי את אי-הנוחות התרמית הנגרמת כתוצאה משילוב של טמפרטורה גבוהה ולחות גבוהה. המדד, אשר הוצע על ידי עזרה זוהר, מתאים לאקלים חם בלבד, משום שאינו מבחין בין תנאים נוחים לתנאים קרים מדי.

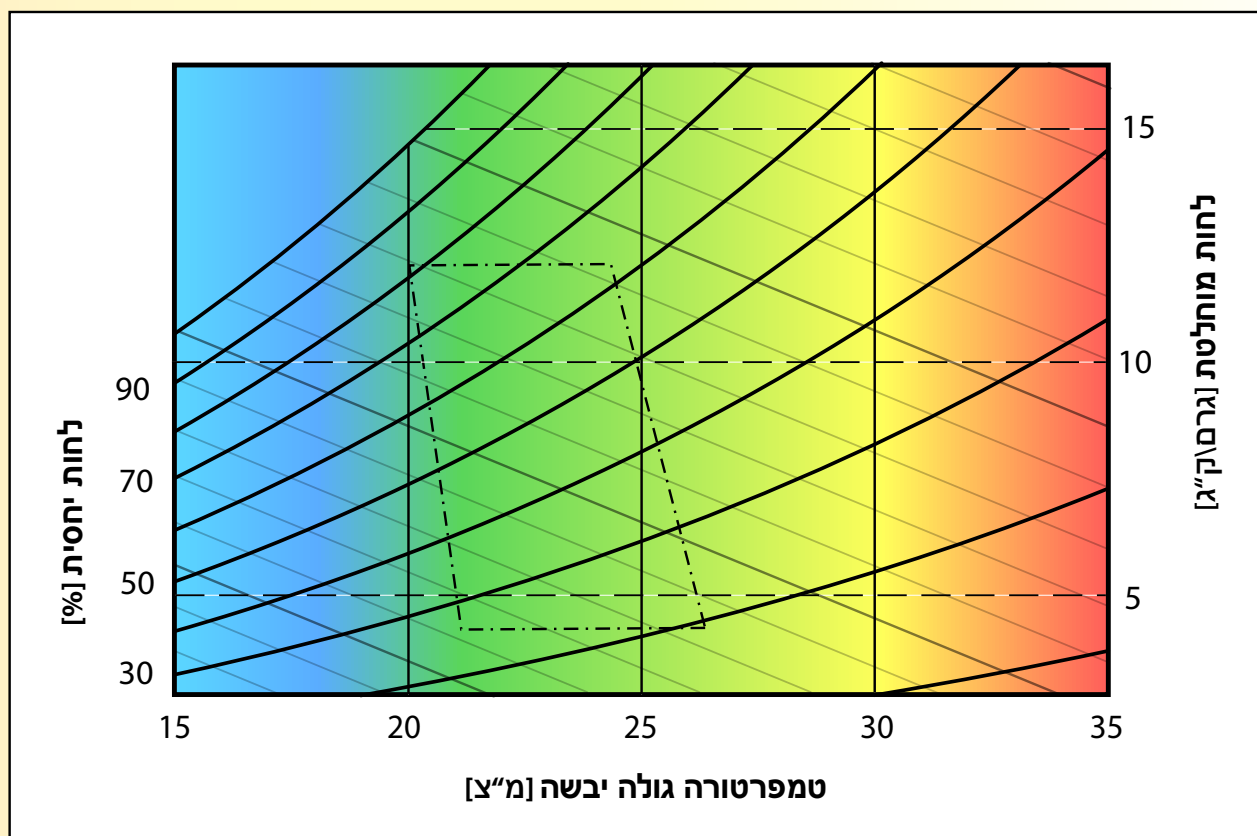
מקדם אי-הנוחות (discomfort index) מחושב על פי הממוצע של טמפרטורת הגולה היבשה של האוויר

נמוכות יותר על ידי חשיפה לקרינת שמש (נקודה A במפה), או לטמפרטורות אוויר גבוהות יותר כאשר האוויר נמצא בתנועה (נקודה B במפה).

הטבלה הפסיכרומטרית

הטבלה הפסיכרומטרית (ראה איור 5.3) היא תרשים המתאר את הקשר בין טמפרטורת האוויר ומדדים שונים ללחות (וכן לצפיפות האוויר):

- קווים אנכיים הנמשכים אל הציר האופקי של התרשים מציגים את טמפרטורת האוויר (גולה יבשה או מדד אחר, כגון טמפרטורה אפקטיבית)
- קווים אופקיים הנמשכים אל הציר האנכי (מימין) מציגים את תכולת אדי המים באוויר (לחות מוחלטת)
- העקומות האקספוננציאליות מתארות את הלחות היחסית
- הקווים האלכסוניים מייצגים את טמפרטורת הגולה הלחה



איור 5.3. הטבלה הפסיכרומטרית, עם סימון של תחום הנוחות.

את הטמפרטורה הקרינתית הממוצעת לא ניתן למדוד ישירות, אולם ניתן לחשב אותה על פי הנוסחה הבאה:

$$MRT = \sqrt[4]{\sum_n (F_{p-i} \times T_i^4)}$$

MRT – טמפרטורת קרינתית ממוצעת $[^{\circ}C]$

F_{p-i} – הזווית המרחבית אותה תוחם משטח i ביחס לנקודה p

T_i – הטמפרטורה של משטח i $[^{\circ}C]$

הזווית המרחבית דומה לגזרת החשיפה שמתוארת עבור שטחי חוץ, בפרק 7 (ראה המחשה באיור 7.4).

טמפרטורה אופרטיבית
(OT - operative temperature)

הטמפרטורה האופרטיבית הינה מדד מלאכותי אשר מיועד להציג את ההשפעה המשולבת של טמפרטורת

(המבטאת את השפעת הטמפרטורה) ושל טמפרטורת הגולה הרטובה (המבטא את השפעת הלחות):

$$discomfort\ index = \frac{DBT + WBT}{2}$$

ערכים המופיעים בטבלה 5.3 מתייחסים לבני אדם הנמצאים בצל ובתנאים של היעדר רוח.

טמפרטורה קרינתית ממוצעת
(MRT - mean radiant temperature)

הטמפרטורה הקרינתית הממוצעת היא מדד להשפעת הטמפרטורה של כל העצמים המקיפים נקודה נתונה במרחב על מאזן הקרינה באותה נקודה.

הגדרה:

הטמפרטורה הקרינתית הממוצעת בנקודה היא הטמפרטורה (האחידה) של כדור "שחור" דמיוני המקיף אותה ויוצר מאזן קרינה שווה לזה של הסביבה האמיתית.



מקדם אי-נוחות	עומס חום
<22	אין
22-24	קל
24-28	בינוני
>28	כבד

טבלה 5.3. דרגות עומס חום בהתאם לערכים של מקדמי אי-נוחות.

המקיף אותה, ואשר הלחות היחסית בו הינה 50% וחילופי האנרגיה של אדם עם סביבתו בקרינה, הסעה ואידוי יהיו שווים לאלו המתקיימים בסביבה האמיתית.

9. סיכום

הבנת הסוגיות השונות הקשורות לנוחות תרמית עשויה לתרום לא מעט לתכנון סביבה בנויה אשר משרתת את האוכלוסייה השווה בה באופן מיטבי. רצוי לתכנן את הבניין כך שלכל אחד ואחד מדייריו ישנה שליטה רבה עד כמה שאפשר בכל הגורמים המשפיעים על הנוחות. מחקרים רבים, בעיקר בבנייני משרדים, מראים כי בקרה אישית על התנאים בסביבת העבודה עשויה להגדיל במידה ניכרת את התפוקה ופריון העבודה. לשליטה בסביבה ישנה חשיבות פסיכולוגית שאינה נופלת מן ההיבטים האקלימיים, אולם ברבים מן המשרדים המודרניים לעובד הממוצע יש לכל היותר שליטה על מנורה אישית. הערך המוסף הכלכלי של תכנון נכון עולה לעין ערוך על העלות הנוספת הכרוכה בהתקנת מערכות בקרה אישיות, מה גם שרבים מהמרכיבים של תכנון מודע אקלים אינם מביאים בהכרח לייקור הבנייה.

כפי שהוסבר לעיל, ההעדפות התרמיות של אנשים מושפעות במידה לא מעטה מדפוסי ההתנהגות המקובלים בחברה לה הם שותפים. הבדלים בסגנון הלבוש, למשל, משפיעים במידה לא מעטה על מעבר האנרגיה בין האדם והסביבה, ובהתאם לכך על תחושת הנוחות בתנאים סביבתיים נתונים. לשינויים שחלו בדפוסי הלבוש בארץ במשך השנים ישנה, לפיכך, השפעה רבה על צריכת האנרגיה בבניינים מאוקלמים, בייחוד בבנייני משרדים.

האוויר ומאזן הקרינה על חילוף אנרגיה בין האדם והסביבה.

הגדרה:

הטמפרטורה האופרטיבית בנקודה נתונה הינה טמפרטורת הגולה היבשה של כדור "שחור" דמיוני המקיף אותה ואשר בו חילופי האנרגיה של אדם עם סביבתו בקרינה והסעה יהיה שווים לאלו המתקיימים בסביבה האמיתית.

ניתן לחשב את הטמפרטורה האופרטיבית בעזרת הנוסחה הבאה:

$$OT = \frac{h_r \times MRT + h_c \times DBT}{h_r + h_c}$$

OT – טמפרטורה אופרטיבית [°C]

MRT – טמפרטורת קרינתית ממוצעת [°C]

DBT – טמפרטורת גולה יבשה [°C]

h_r – מקדם מעבר אנרגיה בקרינה [W/m²°C]

h_c – מקדם מעבר אנרגיה בהסעה [W/m²°C]

כאשר משתמשים בטבלה הפסיכרומטרית בטמפרטורה האופרטיבית בציר האופקי במקום בטמפרטורת הגולה היבשה, ניתן להציג על הטבלה קווים של הטמפרטורה האפקטיבית החדשה ובאמצעותם לתאר את תחום הנוחות התרמית באופן שיבטא גם את השפעת מאזן הקרינה על האדם.

טמפרטורה אפקטיבית חדשה

(ET* - new effective temperature)

הטמפרטורה האפקטיבית החדשה הינה מדד מלאכותי אשר מיועד להציג את ההשפעה המשולבת של טמפרטורת האוויר, הלחות ומאזן הקרינה על חילוף אנרגיה בין האדם והסביבה.

הגדרה:

הטמפרטורה האפקטיבית החדשה (ET*) בנקודה נתונה הינה טמפרטורת הגולה היבשה של כדור "שחור" דמיוני



6. מעבר אנרגיה

הגדרה:

כל אימת שקיים הבדל טמפרטורה בין שתי נקודות במרחב מתרחש מעבר אנרגיה ביניהן. מעבר האנרגיה עשוי להתרחש בין אם הבדלי הטמפרטורה קיימים בנקודות שונות של אותו חומר ובין אם מדובר בחומרים שונים.

מעבר אנרגיה עשוי להתרחש בשלושה אופנים:

- כל חומר פולט קרינה (radiation) אלקטרומגנטית. כאשר התווך בין שתי נקודות במרחב מאפשר מעבר קרינה (או בהיעדר תווך, כלומר במצב של ריק מוחלט), יתרחש מעבר אנרגיה ביניהן. אם הטמפרטורה השוררת בשתי הנקודות שונה, יהיה מאזן האנרגיה ביניהן שונה מאפס.
- כאשר שתי נקודות בעלות טמפרטורה שונה נתונות בחומר במצב צבירה מוצק, מעבר האנרגיה ביניהן יתרחש בתהליך הקרוי הולכה (conduction).
- מעבר אנרגיה בין מוצק לנוזל או בין מוצק לגז, וכן מעבר אנרגיה בתווך הנמצא בתנועה, קרוי הסעה (convection).

1. קרינה

של פני השטח שלו ונתון על ידי המשוואה הבאה (חוק סטפן-בולצמן):

$$R = \epsilon \sigma T^4$$

R - שטף קרינה [W/m^2]

ϵ - מקדם הפליטה של פני השטח

σ - מקדם סטפן-בולצמן [$5.67 \times 10^{-8} W/m^2$]

T - טמפרטורה מוחלטת לפי סולם קלווין [K]

קרינה אלקטרומגנטית נהוג לאפיין על פי אורך הגל שלה. לקרינה באורכי גל שונים תכונות שונות, הבאות לידי ביטוי במעבר האנרגיה בתוך הבניין ובין הבניין והסביבה. אורך הגל של הקרינה תלוי בטמפרטורת הפנים של הגוף המקרין, ונתון על ידי המשוואה הבאה (חוק ויין):

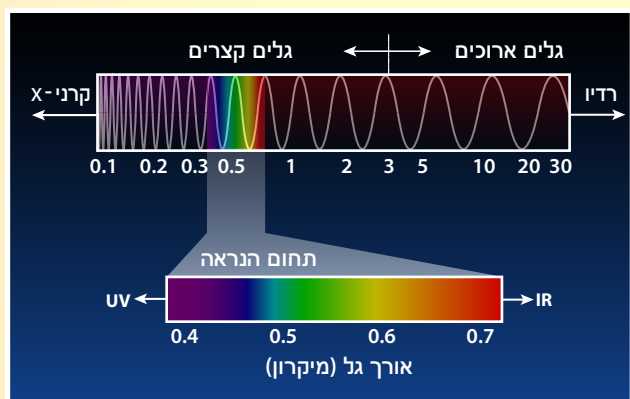
$$\lambda_{max} = \frac{1880}{T}$$

בעוד שמעבר אנרגיה בהולכה ובהסעה מתרחש רק בנוכחות חומר, מעבר אנרגיה בקרינה עשוי להתרחש גם בריק. יתירה מכך, מעבר אנרגיה בריק יעיל יותר מאשר בכל חומר. אף כי גם נוזלים וגזים פולטים קרינה, התיאור שלהלן יתייחס מטעמי נוחיות בעיקר לפליטת קרינה ממוצקים.

שטף פליטת האנרגיה מגוף במרחב תלוי בטמפרטורה

דוגמא:

אנרגיה שמקורה בשמש נקלטת בקולטים לחימום מים, לאחר שעברה מרחק של מיליוני קילומטרים בחלל. מעבר האנרגיה מתבצע בקרינה.



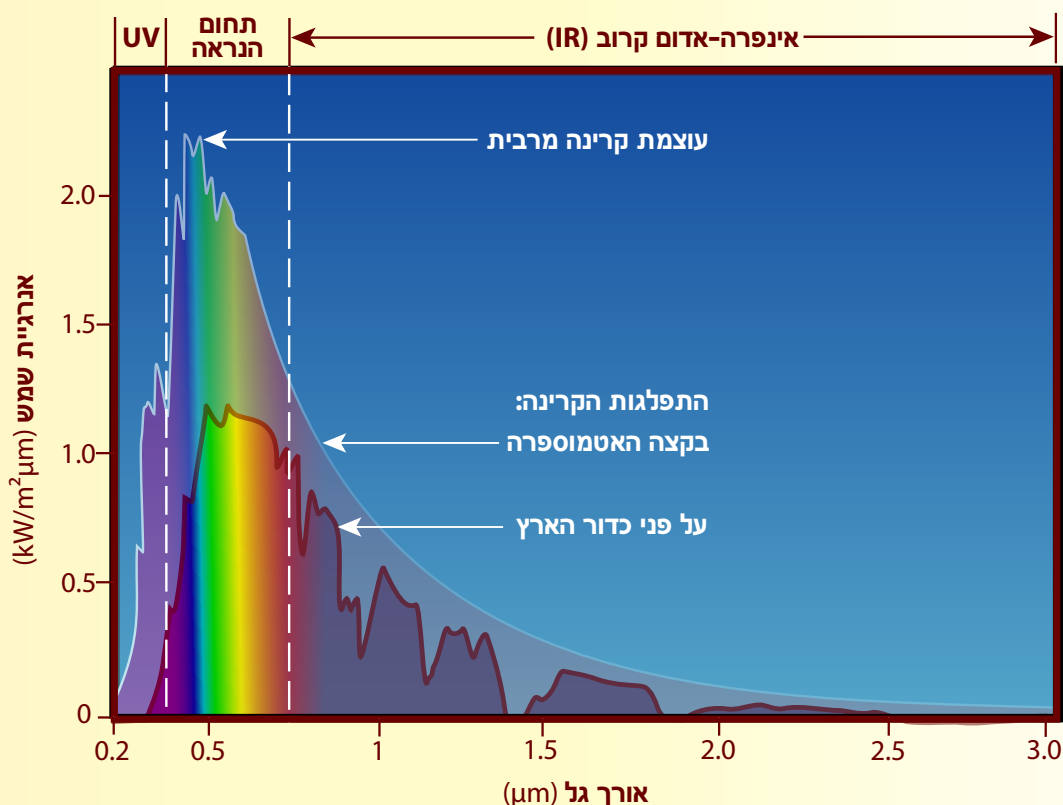
איור 6.1. ספקטרום הקרינה האלקטרומגנטית, בהדגשת התחום הנראה.

λ_{max} - אורך הגל שבו עוצמת הקרינה מרבית (μm)
 T - טמפרטורה מוחלטת לפי סולם קלווין [K]

הקרינה הנפלטת מגופים חמים מאוד, כגון השמש, שטמפרטורת הפנים שלה היא בערך 6,000 מעלות קלווין, מכונה קרינה בגלים קצרים. הקרינה הנפלטת מגופים קרים יותר, כגון פני כדור הארץ, שהטמפרטורה הממוצעת שלהם היא 300 מעלות קלווין בקירוב, מכונה קרינה בגלים ארוכים או קרינה אינפרא-אדומה. התרשים מתאר את הספקטרום האלקטרומגנטי, בדגש על קרינת השמש ועל קרינה אינפרא אדומה.

1.1 קרינה בגלים קצרים (קרינת שמש)

הקרינה הנפלטת מפני השמש נמצאת בתחום אורכי הגל שבין 0.15 מיקרון ו-3 מיקרון, בקירוב. כ-47% מקרינה זו נמצא בתחום הנראה לבני אדם, באורכי גל שבין 0.39 ו-0.76 מיקרון; כ-50% נמצאים בתחום האינפרא אדום הקרוב, בין 0.8 ו-3 מיקרון, בערך; היתרה היא קרינה אולטרה-סגולה. עוצמתה של קרינת השמש משתנה כתלות בזמן ובמרחב, וניתן לבטא את התנועה המחזורית של השמש יחסית לפני הארץ באמצעות **גיאומטריה סולרית**.



איור 6.2. עוצמתה של קרינת השמש באורכי גל שונים.

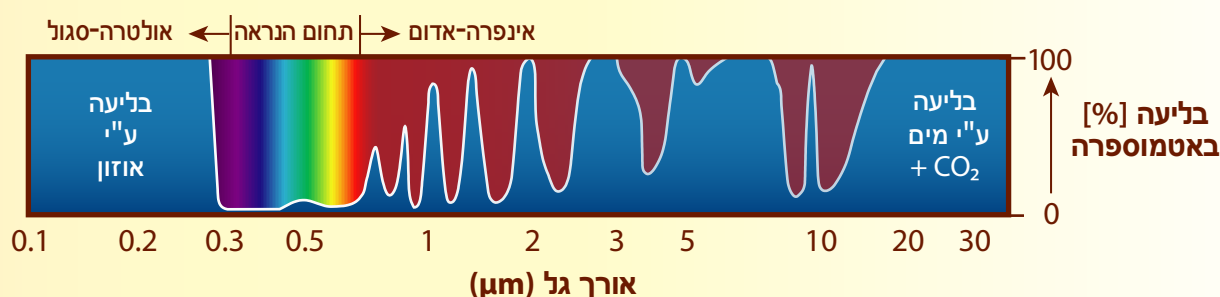


1.2 קרינה בגלים ארוכים (קרינה אינפרא אדומה)

חלק ניכר מקרינת השמש הפוגעת בשכבה העליונה של האטמוספירה אינו מגיע לפני כדור הארץ, לרבות קרינה בתחום הנראה. ראוי לציין כי האטמוספירה גם מסננת את כמעט כל הקרינה האולטרה-סגולה, העלולה לגרום לנזקים קשים לבני האדם.

האטמוספירה בולעת את החלק העיקרי של הקרינה האינפרא אדומה הנפלטת מכדור הארץ. המרכיבים העיקריים האחראים לבליעת הקרינה הם אדי מים ודו-תחמוצת הפחמן (CO_2) המצויים אמנם באטמוספירה בשיעורים נמוכים (פחות מאחוז אחד), אבל השפעתם על האקלים רבה מאוד.

מיעוט אדי מים באטמוספירה של אזורים מדבריים מאפשר קירור קרינתי יעיל יותר מכפי שמתרחש באזורים לחים, והוא אחת הסיבות לכך שהלילות במדבר קרים יותר.



איור 6.3. אדי מים ודו-תחמוצת הפחמן באטמוספירה בולעים את רוב הקרינה האינפרא-אדומה.

1.3 בליעה, העברה והחזרה

כאשר קרינה פוגעת בפניו של גוף כלשהו, היא עשויה להבלע בו, להיות מוחזרת ממנו, או לעבור דרכו. החלק היחסי של הבליעה, ההחזרה וההעברה של הקרינה תלוי, בזווית הפגיעה בפני השטח, באורך הגל של הקרינה ובתכונות החומר.

את תכונות החומר מייצגים בעזרת שלושה מקדמים, שסכומם שווה לאחד:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

α - מקדם הבליעה (absorptivity)

ρ - מקדם ההחזרה (reflectivity)

τ - מקדם ההעברה (transmissivity)



איור 6.4. תהליכים המתרחשים כאשר קרינה פוגעת בחומר.

השינוי בזווית הפגיעה. חשוב להדגיש גם כי ישנם חומרים אשר מקדם הבליעה שלהם שונה לחלוטין כאשר מדובר בקרינה באורכי גל שונים, למשל קרינת שמש בהשוואה לקרינה אינפרא אדומה. לתכונה זו יש חשיבות מיוחדת בהקשר של חומרי זיגוג.

מקובל לתאר את תכונות החומר בהתייחס לקרינה הפוגעת בניצב לפניו, אולם חשוב להדגיש שוב כי ערכם של המקדמים עשוי להשתנות במידה משמעותית עם

**דוגמא חישובית:**

נניח שקרינת שמש פוגעת בלוח אלומיניום מבריק, אשר מקדם הבליעה שלו בגלים קצרים הוא 0.15 בלבד, כלומר הוא בולע 15% מקרינת השמש. מאחר ומקדם הפליטה של אלומיניום מבריק בתחום האינפרא-אדום הוא 0.08 בלבד, החלק היחסי של קרינת השמש אשר תיוותר בלוח הוא:

$$15 - (15 \times 0.08) = 13.8\%$$

לשם השוואה, אם אותו לוח יהיה צבוע בצבע לבן מבריק, יהיה מקדם הבליעה שלו מעט גבוה יותר, 0.2, או 20%. מאחר ומקדם הפליטה של צבע לבן לקרינה בגלים ארוכים הוא כ-0.9, החלק היחסי של קרינת השמש אשר יישאר בלוח יהיה קטן יותר במידה ניכרת:

$$20 - (20 \times 0.9) = 2.0\%$$

הנטייה של חומר לבלוע קרינה באורך גל מסוים, אותה מציינים באמצעות מקדם הבליעה, באה לידי ביטוי גם כאשר כיוון מעבר הקרינה הוא הפוך. על פי חוק קירכוף, מקדם הבליעה של חומר (absorptivity) זהה תמיד למקדם הפליטה שלו (emissivity), עבור כל אורך גל נתון, טמפרטורת פנים וזווית פגיעה (פליטה) של הקרינה:

$$\alpha_{\lambda}^{(T, \theta, \phi)} = \xi_{\lambda}^{(T, \theta, \phi)}$$

α - מקדם הבליעה (absorptivity)

ξ - מקדם הפליטה (emissivity)

λ - אורך גל (wavelength)

T - טמפרטורה

θ - קואורדינטה מרחבית

ϕ - קואורדינטה מרחבית

מקדם פליטה בקרינה אינפרא אדומה	מקדם החזרה לקרינת שמש	חומר גמר
0.88	0.40	בטון חשוף
0.95	0.23	לבני חימר
0.95	0.43	אבן גיר
0.95	0.40	עץ (אורן)
0.28	0.15	פלדה מגולוונת (חשופה)
0.08	0.85	לוח אלומיניום (מבריק)
0.91	0.80	צבע לבן
0.90	0.10	צבע שחור

טבלה 6.1. מקדמי החזרה ופליטה של קרינה עבור חומרי בנייה נבחרים



2. הולכה

כאשר בין שתי נקודות שונות בגוף מוצק שורר הבדל טמפרטורה, מעבר האנרגיה ביניהן יתרחש בתהליך הקרוי הולכה. הולכת אנרגיה בחומר מוצק מתרחשת ברמה המולקולרית, ואינה כרוכה בתנועה של המסה המרכיבה את הגוף.

דוגמא:

כאשר טובלים כפית בכוס מים חמים, גם החלק שאינו בא במגע עם המים מתחמם. חימום זה נובע ממעבר אנרגיה בהולכה.



2.1 התנגדות תרמית ומוליכות תרמית

קצב מעבר האנרגיה בהולכה בין שתי נקודות בגוף מוצק תלוי בהפרש הטמפרטורה ביניהן, במרחק המפריד ביניהן ובתכונות החומר. את הקשר בין הגורמים האלה ניתן להציג בנוסחה הבאה:

$$Q = \lambda \frac{T_2 - T_1}{d}$$

Q - שטף האנרגיה ליחידת שטח [W/m^2]

λ - מקדם המוליכות התרמית [W/m K]

T - טמפרטורה בנקודה נתונה [K]

d - המרחק בין שתי הנקודות [m]

מקדם המוליכות התרמית (λ , thermal conductivity) הוא ביטוי לנטייה של החומר להוליך חום. חומרים בעלי מקדם מוליכות גבוה מעבירים חום היטב, בעוד שחומרים בעלי מקדם מוליכות נמוך נקראים חומרי בידוד תרמי.

מקדם ההתנגדות התרמית (r , thermal resistivity) הוא הערך ההופכי למקדם המוליכות התרמית (λ), כלומר: $r = 1/\lambda$

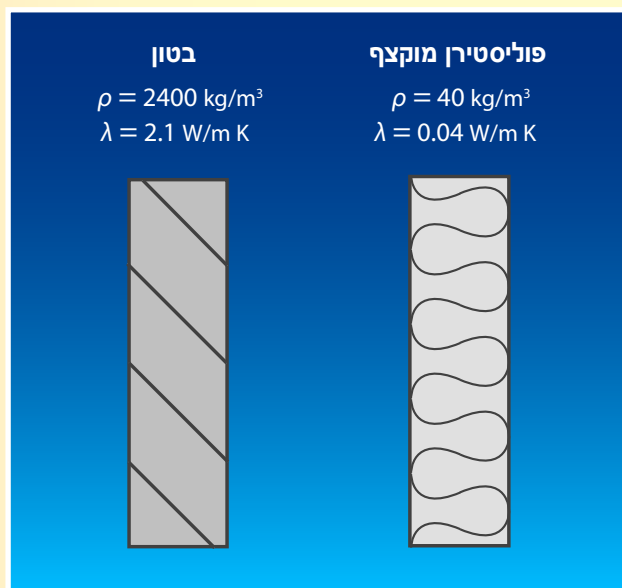
דוגמאות לתכונות התרמיות של חומרי בנייה נפוצים מובאות בטבלה הבאה:

מוליכות תרמית λ [W/m K]	התנגדות תרמית r [m K/W]	משקל סגולי ρ [kg/m ³]	החומר
0.027	37	27	פוליאוריתן מוקצף
0.040	25	40	פוליסטירן מוקצף (קל-קר)
0.22	4.5	650	בטון תאי (כגון איטונג)
1.25	0.8	2000	טיח צמנטי
2.1	0.48	2400	בטון
67	0.015	7800	ברזל

טבלה 6.2. תכונות תרמיות של חומרי בנייה נבחרים



עיון בטבלה מראה שהחומרים בעלי המשקל הסגולי הנמוך הם בדרך כלל מוליכים גרועים, כלומר מבודדים, בעוד שחומרים צפופים הם בדרך כלל מוליכים טובים.



איור 6.5. הצפיפות ומקדם ההתנגדות התרמית של בטון ושל קלקר.

כאשר מחשבים את מעבר האנרגיה בהולכה דרך רכיב בניין מסוים, כגון קיר, יש להביא בחשבון גם את עובי החומר: ככל שהחומר עבה יותר, כך גדלה ההתנגדות התרמית הכוללת של הרכיב. הקשר בין ההתנגדות התרמית האופיינית (thermal resistance) של רכיב בניין לבין עוביו והמוליכות התרמית של החומר נתון על ידי הביטוי הבא:

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

R - התנגדות תרמית של רכיב בניין [$\text{m}^2 \text{ K/W}$]

d - עובי האלמנט [m]

λ - מקדם המוליכות התרמית [W/m K]

על מנת לחשב את מעבר האנרגיה דרך רכיב בניין המפריד בין חללים שונים בבניין או בין חלל פנימי לחלל חיצוני, יש להביא בחשבון גם את ההתנגדות התרמית הפנית שיוצרת שכבת גבול בין הרכיב והאוויר הסמוך לו.

ההתנגדות התרמית הכוללת של רכיב בניין (total thermal resistance) היא אפוא הסכום של ההתנגדות התרמית האופיינית של הרכיב וההתנגדות התרמית הפנית של שתי פאותיו:

$$R_{tot} = \frac{1}{h_{in}} + R + \frac{1}{h_{out}}$$

R_{tot} - התנגדות כוללת של רכיב בניין [$\text{m}^2 \text{ K/W}$]

R - התנגדות אופיינית של הרכיב [$\text{m}^2 \text{ K/W}$]

$1/h_{in}$ - התנגדות של הפנית הפנימית [$\text{m}^2 \text{ K/W}$]

$1/h_{out}$ - התנגדות של הפנית החיצונית [$\text{m}^2 \text{ K/W}$]

ההתנגדות התרמית הפנית עשויה להוות חלק ניכר מההתנגדות התרמית הכוללת של רכיב בניין.

דוגמא:

להלן מובא לדוגמא חישוב ההתנגדות התרמית הכוללת של לוח זכוכית אנכי בעובי 3 מ"מ:

שכבת גבול פנימית:

$$R = 1/h_{in} = 0.12$$

זכוכית:

$$\lambda = 0.8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$d = 0.003 \text{ m}$$

$$R = 0.003/0.8 = 0.00375$$

שכבת גבול חיצונית:

$$R = 1/h_{in} = 0.04$$

סה"כ:

$$R_{tot} = 0.12 + 0.00375 + 0.04 \\ \approx 0.16 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$



הזכוכית מוליכה חום היטב. מאחר ועובייה קטן מאוד, הרי שההתנגדות התרמית של לוח הזכוכית עצמו היא זניחה, ועיקר ההתנגדות מושגת בשכבות הגבול.

כאשר גוף עשוי מספר שכבות בעלות תכונות תרמיות שונות, ההתנגדות התרמית האופיינית של הרכיב (R_{tot}) שווה לסכום החשובי של ההתנגדויות (r_i) של כל השכבות:

$$R_{tot} = r_1 + r_2 + \dots + r_n$$

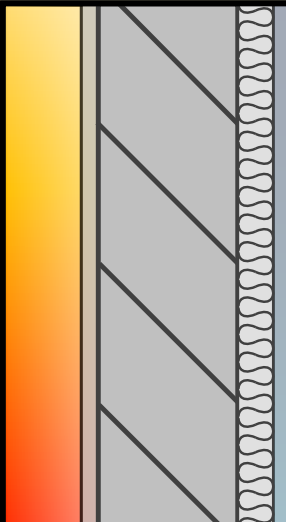
חשוב לציון שבעוד שניתן לחבר בצורה פשוטה וישירה את ההתנגדות התרמית של מספר שכבות בכדי לקבל את ההתנגדות התרמית הכוללת של רכיב בניין, אין הדבר נכון ביחס לחישוב המוליכות התרמית הכוללת (total thermal conductance, אותה מקובל לסמן באות 'U').

כאשר מעונינים במוליכות התרמית הכוללת יש אפוא לחשב קודם את ההתנגדות הכוללת (R), וממנה לחשב את המוליכות באמצעות הקשר הבא:

$$U = 1/R_{tot}$$

U - מוליכות תרמית כוללת [$W/m^2 K$]

R_{tot} - התנגדות כוללת של רכיב בניין [$m^2 K/W$]



חומר	r_i
שכבת גבול פנים	0.12
טיח פנים	0.01
בטון (20 ס"מ)	0.10
פוליסטירן מוקצף (5 ס"מ)	1.25
טיח חוץ	0.02
שכבת גבול חוץ	0.04
סה"כ (R_{tot})	~1.54

איור 6.6. חישוב ההתנגדות התרמית הכוללת של קיר בן מספר שכבות.

2.2 אגירת חום

כאשר התנאים אינם משתנים לאורך זמן, כלומר מתקיים 'מצב יציב' (steady-state), מעבר החום דרך גוף מוצק תלוי רק במוליכות התרמית הכוללת שלו. אולם כאשר התנאים משתנים לאורך זמן, מעבר האנרגיה דרך רכיב בניין תלוי גם בקיבול החום של החומר.

הגדרה:

קיבול חום נפחי של חומר (volumetric heat capacity) הוא כמות האנרגיה אשר תביא לעליית טמפרטורה של מעלה אחת ליחידת נפח. קיבול חום מכונה גם 'מסה תרמית'.

כאשר גוף כגון רכיב בניין קולט אנרגיה, הוא מתחיל להתחמם. אם החומר ממנו הוא עשוי יהיה בעל קיבול חום גבוה, כמות האנרגיה אשר תיבלע בו עשויה להיות גבוהה, ולכן השינוי בטמפרטורה שלו יהיה מתון בהשוואה לגוף החשוף לתנאים דומים אך עשוי חומר בעל קיבול חום נמוך.

ישנם הבדלים גדולים בקיבול החום של חומרים שונים, כפי שמתבטא בטבלה הבאה:

בעוד שקיבול החום של חומר הוא תכונה הקשורה לנפחו של גוף, החום הסגולי שלו הוא כמות האנרגיה אשר תביא לעליית טמפרטורה של מעלה אחת ליחידת מסה. הקשר בין קיבול חום (C) לבין חום סגולי נתון בביטוי הבא:

$$C = \rho c_p$$

ρ - צפיפות החומר [kg/m^3]

c_p - החום הסגולי של החומר [kJ/kg]



חומר	צפיפות kg/m^3	חום סגולי kJ/kg K	קיבול חום נפחי $\text{kJ/m}^3 \text{ K}$
בטון	2400	0.85	2040
בטון תאי (כגון איטונג)	600	0.95	570
מים	1000	4.18	4180
אוויר	1.18	1.30	1.5

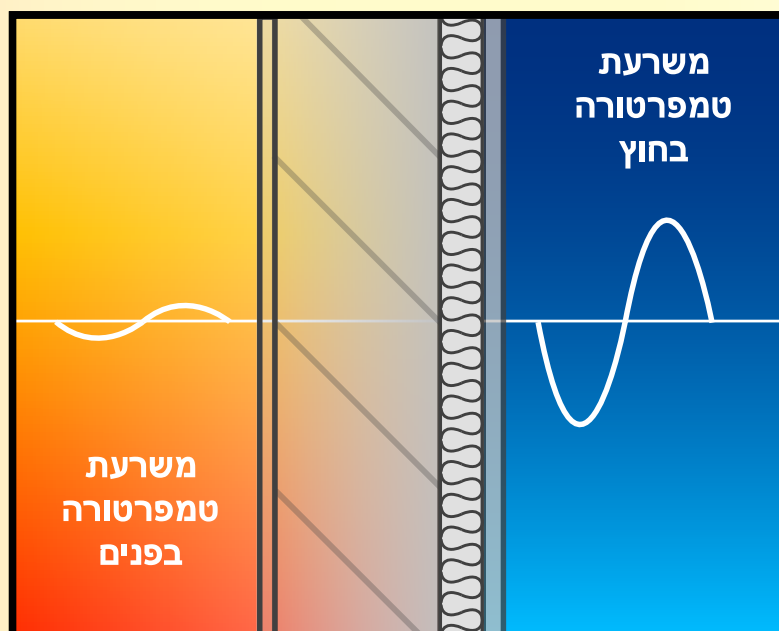
טבלה 6.3. קיבול החום של חומרים שונים

לנוכחות של מסה תרמית רבה בבניין מספר השלכות על התפקוד התרמי שלו:

א. המסה התרמית מקטינה את משרעת הטמפרטורה היומית: בבניין עם קיבול חום גבוה תנודות הטמפרטורה העלולות להיווצר בתגובה לעומסים חיצוניים או פנימיים תהיינה קטנות יותר מאשר בבניין עם קיבול חום נמוך.

ב. המסה התרמית מעכבת את מעבר האנרגיה דרך החומר.

דוגמא:



את ההשפעה של המסה התרמית על מעבר אנרגיה דרך רכיב בניין אפשר להמחיש באמצעות ההשוואה בין לוח פוליסטירן מוקצף בעובי 10 מ"מ ללוח בטון בעובי 500 מ"מ. לשניהם מוליכות תרמית כוללת של כ-4 וט / מ² למעלה צלזיוס. בתנאים קבועים ('מצב יציב'), יהיה מעבר החום דרך הרכיבים זהה. אולם בחשיפה לטמפרטורה המשתנה באופן מחזורי, למשל בהתאם לשינויים היומיים במזג האוויר, יהיה מעבר האנרגיה שונה לחלוטין, הן בגודלו והן בתזמון.

איור 6.7. כאשר הבידוד התרמי נמצא בצידו החיצוני של הקיר, והמסה בצידו הפנימי, תהיה משרעת הטמפרטורה בפנים קטנה.



3. הסעה

כאשר בין שתי נקודות בתוך תווך נוזלי (או גז) קיים הבדל טמפרטורה, מתרחש מעבר האנרגיה ביניהן בהסעה (convection), תהליך המתבצע בשני מנגנונים: בנוסף לתנועה האקראית של הפרודות המרכיבות את החומר (דיפוזיה), מתרחש מעבר אנרגיה כתוצאה מתנועה של נפח הנוזל (או הגז) כולו. גם מעבר אנרגיה בין גוף מוצק לתווך זורם הנמצא סמוך לו מתבצע בהסעה.

דוגמא:

כאשר מחממים מים בסיר, מקור האנרגיה הוא בלהבה שמתחתיו. החום מועבר מקרקעית הסיר אל שכבת המים הסמוכה אליה, ומשם אל שאר המים, בהסעה.

חדירת אוויר חיצוני אל תוך הבניין או דליפה של אוויר פנים החוצה כרוכה בדרך כלל בהסעת אנרגיה, משום שרק לעתים רחוקות תהיה הטמפרטורה הפנימית זהה לזו השוררת בחוץ. כאשר מעבר האוויר הינו רצוי ומבוקר, הוא מכונה 'אוורור'. כאשר מעבר האוויר מתרחש בצורה של חדירה בלתי מבוקרת דרך חריצים במעטפת הבניין הוא מכונה 'אינפילטרציה'.

3.1 שכבת הגבול ומעבר האנרגיה בין מוצק וזורם

כאשר זורם (גז או נוזל) נע בסמוך למוצק, נוצרת שכבה אשר בה משתנות תכונות הזורם כתוצאה מהמגע עם המוצק. שכבה זו קרויה שכבת גבול (הידרודינמית או אוירודינמית), אשר התנאים בה משתנים בהתאם לתכונות הזורם, מאפייני הזרימה, הגיאומטריה של פני המשטח והמרחק ממנו. כאשר קיים הפרש טמפרטורה בין הגוף לבין הזורם, נוצרת שכבת גבול תרמית אשר בה מורגש הבדל טמפרטורות הנובע מהמגע עם הגוף המוצק. עובי שכבות הגבול ההידרו-דינמית והתרמית אינו בהכרח שווה.

שבתוך הבניין תנועת האוויר היא איטית ביותר, הרי שהרוח הנושבת על פני משטחים חיצוניים מהווה גורם עיקרי במעבר חום בין רכיב הבניין והאוויר בסביבה.

המוליכות התרמית הפנית של משטח אופקי, כגון רצפה או תקרה, מושפעת מכיוון זרימת החום: כאשר הרצפה חמה יותר מאשר האוויר שמעליה, האוויר שבא איתה במגע יתחמם. הנטייה של אוויר חם לעלות תרחיק אותו מפני הרצפה ותביא לכך שתהליך מעבר האנרגיה יהיה יעיל. כאשר התקרה חמה יותר מאשר האוויר שמתחתיה, האוויר הסמוך לה יתחמם – אך יישאר כלוא בשכבה דקה בקרבתה. מעבר החום במקרה כזה הוא לפיכך יעיל פחות.

חשוב לציין כי הנתונים המובאים כאן מציגים ערכים ממוצעים אופייניים, וגודלה של המוליכות התרמית הפנית של משטחים החשופים לסביבה החיצונית עשוי להיות שונה במידה ניכרת בתגובה לתנאים המקומיים. מחקרים רבים מצאו קשר ברור בין מהירות תנועת האוויר סמוך למשטח לבין המוליכות התרמית הפנית שלו.

מעבר האנרגיה בין גוף מוצק לזורם הנע על פניו תלוי בהפרש הטמפרטורה ביניהם ובמוליכות התרמית הפנית (convective surface heat transfer coefficient), ונתון על ידי הביטוי הבא:

$$Q_H = h_c (T_s - T_a)$$

Q_H - שטף חום מוחש $[W/m^2]$

h_c - מוליכות תרמית פנית $[W/m^2 K]$

T_s, T_a - טמפרטורות של המשטח והאוויר $[K]$

גודלה של המוליכות התרמית הפנית מושפע מתכונות הזורם, ממאפייני הזרימה ומהיחסים המרחביים בין פני המוצק לבין הנוזל.

הערכים של המוליכות התרמית הפנית שמוצגים בטבלה מתייחסים למעבר אנרגיה בין רכיבי בניין לבין אוויר הבא איתם במגע. ההבדל בין המוליכות התרמית הפנית של משטחים פנימיים ומשטחים חיצוניים נובע מהבדלים במהירות תנועת האוויר על פניהם. בעוד



מוליכות תרמית פנית של רכיב הפונה כלפי פנים W/m^2K	מוליכות תרמית פנית של רכיב הפונה כלפי חוץ W/m^2K	כוון זרימת החום
8	25	
8	25	
6	25	

טבלה 6.4. מוליכות תרמית פנית של רכיבי בניין (מותאם מתקן ישראלי 1045)

זורמים הנעים במהירות גבוהה יחסית, או שהם בעלי צמיגות נמוכה, נעים בזרימה טורבולנטית. כלומר, מהירות התנועה של הנוזל וכיוונה עשויים להשתנות מרגע לרגע וממקום למקום במרחב. זרימה טורבולנטית מאופיינת במערבולות בגדלים שונים ובעלות עוצמה משתנה.

תנועה טורבולנטית ניתן לתאר באמצעות שני רכיבים: רכיב ממוצע (בזמן ובמרחב) ורכיב משתנה. הרכיב המשתנה עשוי להיות אקראי, אולם במקרים רבים נוספת אל השינוי האקראי גם התנהגות מחזורית.

כאשר הזרימה היא למינרית, מעבר חום בניצב לכיוון התנועה מתרחש בדיפוזיה בלבד. מנגנון זה הינו חלש מאוד, וקצב מעבר האנרגיה עשוי להיות איטי מאוד ולא יעיל. כאשר הזרימה היא טורבולנטית, לעומת זאת, ישנה תנועת מסה גם בניצב לכיוון העיקרי של התנועה, ומעבר החום בכיוון זה עשוי להיות יעיל מאוד.

זרימת אוויר היא כמעט תמיד זרימה טורבולנטית, למעט בחלק דק מאוד של שכבת הגבול הצמוד לגופים מוצקים שעל פניהם נמדדת התנועה.

למשל: על פי מחקרם של Hagishima & Tanimoto^[11]:

$$h_c = 3.96 v + 6.42 \quad \text{עבור משטחים אופקיים}$$

$$h_c = 10.2 v + 4.47 \quad \text{עבור משטחים אנכיים}$$

$$h_c - \text{מוליכות תרמית פנית } [W/m^2 K]$$

$$v - \text{מהירות הרוח } [m/s]$$

(במרחק של 15 ס"מ מפני השטח, כאשר המדידה מביאה בחשבון רכיבי מהירות בשלושה צירים ניצבים)

הקושי ביישום המודלים שפותחו נובע מן העובדה שבכדי ליישם אותם יש למדוד את מהירות הרוח בסמוך למשטח עצמו, או להשתמש בתוכנות מחשב מסובכות מאוד המנסות לחזות את המהירות המקומית על בסיס מדידות רוח בתחנה המטאורולוגית הסמוכה. בהתחשב במורפולוגיה של הסביבה.

3.2 זרימה טורבולנטית וזרימה למינרית

כאשר נוזל זורם בהשפעה של כוח חיצוני, הזרימה עשויה להיות חלקה, ומהירות הזרימה וכוונה יהיו אז אחידים לחלוטין לאורך זמן. זרימה כזו מכונה זרימה למינרית, והיא אופיינית לזורמים בעלי צמיגות גבוהה הנעים במהירות נמוכה מאוד.

11. Hagishima and Tanimoto, 2003



4. אידוי

התהליך שבו משתנה מצב צבירה של חומר מנוזל לגז קרוי אידוי. תהליך זה דורש השקעת אנרגיה, אשר מקורה עשוי להיות בגז אשר לתוכו מתאדה הנוזל, או מקור חיצוני.

האטמוספירה של כדור הארץ, ובפרט האוויר אשר סביבנו, הינו תערובת של מספר גזים, אשר העיקריים שבהם הינם חנקן, חמצן, דו תחמוצת הפחמן ואדי מים. אולם בעוד שהחלק היחסי של אדי המים באוויר עשוי להשתנות בהתאם לתנאי הסביבה, הרי שחלקם היחסי של המרכיבים האחרים הוא פחות או יותר קבוע. מאחר וכל התהליכים הקשורים באדי המים באוויר אינם מושפעים מנוכחותם של הגזים האחרים, ניתן להתייחס אל האוויר כאל תערובת בעלת שני מרכיבים – 'אוויר יבש' ואדי מים.

את כמות אדי המים באוויר נהוג לחשב ביחס לכמות נתונה של 'אוויר יבש'. היא עשויה להשתנות מאפס (כלומר אוויר יבש לחלוטין), ועד לרוויה. כאשר האוויר נמצא ברוויה, לא ניתן עוד להוסיף אדי מים מבלי להביא לעיבוי של כמות דומה של מים. כמות אדי המים שהאוויר יכול להכיל תלויה בטמפרטורה שלו ובלחץ האטמוספירי: אוויר חם מסוגל להכיל כמות גדולה בהרבה של אדי מים מאשר אוויר קר.

4.1 הטבלה הפסיכרומטרית

את מכלול התכונות של אוויר לח נהוג להציג על גבי טבלה הקרויה **טבלה פסיכרומטרית**. הטבלה הפסיכרומטרית היא תרשים המתאר את הקשר בין טמפרטורת האוויר ומדדים שונים ללחות (וכן לצפיפות האוויר), כדלקמן (ראה **איור 5.3** בפרק 5):

• טמפרטורת גולה יבשה (dry bulb temperature): טמפרטורת האוויר המתקבלת בעזרת מדחום הנמצא בסביבה שבה מאזן הקרינה הוא ניטרלי, המדחום יבש ואין אידוי או עיבוי של מים. יחידות: °C או K.

• תכולת אדי מים באוויר, או לחות מוחלטת (moisture content): המסה של אדי מים באוויר ביחס ליחידת מסה של אוויר יבש. יחידות: g/kg או kg/kg.

• לחות יחסית (relative humidity): היחס בין תכולת אדי המים באוויר לבין תכולת אדי המים שהיו מביאים את האוויר לרוויה, באותה טמפרטורה ובאותו לחץ אטמוספירי. יחידות: %

• לחץ אדים חלקי (partial vapor pressure): אותה חלק מהלחץ האטמוספירי הנמדד כתוצאה מנוכחותם של אדי מים באוויר. יחידות: mb או kPa.

• אנתלפיה (enthalpy): אנתלפיה היא ביטוי לכמות האנרגיה המצויה בחומר. האנתלפיה של אוויר היא הסכום של החום המוחש (sensible heat) והחום הכמוס (latent heat) שלו. בטבלה הפסיכרומטרית מוצגים קווים של אנתלפיה סגולית, שהיא כמות האנרגיה ליחידת מסה של אוויר. יחידות: kJ/kg.

• נפח סגולי (specific volume): הנפח ליחידת מסה של אוויר, בלחץ אטמוספירי נתון. הנפח משתנה כפונקציה של הטמפרטורה של האוויר. יחידות: m³/kg.

• נקודת טל (dew point): טמפרטורת אוויר המתקבלת כאשר מקררים אוויר עד לרוויה, ללא תוספת או גריעה של אדי מים. יחידות: °C או K.

• טמפרטורת גולה לחה (wet bulb temperature): טמפרטורת האוויר המתקבלת כאשר לתוך נפח נתון של אוויר מאדים מים בתהליך אדיאבטי עד שהתערובת מגיעה לרוויה. ניתן למדוד את טמפרטורת הגולה הלחה בעזרת מדחום הנתון בתוך שרוול לח וחשוף לתנועת אוויר בסביבה שבה מאזן הקרינה הוא ניטרלי. טמפרטורת הגולה הלחה משמשת כמדד ללחות של האוויר, אף כי היא נמדדת ביחידות של טמפרטורה. יחידות: °C או K.

תהליך אדיאבטי: תהליך המתקיים ללא תוספת של אנרגיה ממקור חיצוני וללא איבוד אנרגיה אל הסביבה.

4.2 קירור באידוי

לאנרגיה הפנימית של אוויר שני מרכיבים: חום מוחש וחום כמוס.*

* הדיון כאן אינו עוסק באנרגיה כימית ואנרגיה גרעינית המהווים אף הם מרכיבים של האנרגיה הפנימית של חומר.



החשיבות של אדי המים באוויר מן הבחינה האנרגטית באה לידי ביטוי מעשי בפעולתן של מערכות צינון באידי ומערכות מיזוג אוויר רגילות כאחת:

במערכות מיזוג אוויר רגילות, האוויר מקורר כאשר הוא בא במגע עם מחליף חום אשר בתוכו מוזרם נוזל הקירור. מאחר ומחליף החום נמצא בטמפרטורה הקרובה לאפס מעלות (ונמוכה מנקודת הטל), אדי המים הנמצאים באוויר מתעבים כאשר הם באים במגע עמו. בתהליך העיבוי משתחרר חום מוחש רב, ולכן על מערכת מיזוג אוויר הפועלת באקלים לח להתמודד עם עומס גדול בהרבה ממערכת הפועלת בסביבה שבה הטמפרטורה של האוויר זהה אך הלחות נמוכה.

במערכות צינון באידי, מתרחש תהליך הפוך. אוויר חם יחסית ויבש בא במגע עם מים על מצע מיוחד או בצורת טיפות המרוססות לתוכו. אידי של המים סופח אנרגיה רבה מן האוויר, וכתוצאה מכך עשויה לרדת הטמפרטורה שלו במידה ניכרת.

חום מוחש (sensible heat) הוא ביטוי לתנועתם של החלקיקים מהם מורכב החומר. עלייה בכמות החום המוחש בחומר תביא לעלייה בטמפרטורה שלו.

חום כמוס (latent heat) הוא ביטוי לכוחות בין החלקיקים האחראים לקיומם של מצבי הצבירה השונים (מוצק, נוזל או גז).

אל האוויר ניתן כאמור להתייחס כאל תערובת בעלת שני מרכיבים: אוויר יבש ואדי מים. מאחר ובטבע האוויר היבש מצוי רק בצורת גז, הבדלים בחום הכמוס הם תוצאה ישירה של שינוי בכמות אדי המים. אף כי החלק היחסי של אדי המים באוויר הוא נמוך מאוד – פחות משני אחוזים בדרך כלל – לנוכחותם ישנה השפעה רבה על כמות האנרגיה הכוללת (האנתלפיה) של האוויר. הסיבה לכך היא שבעוד שהחום הסגולי של אוויר יבש ושל מים הוא יחסית נמוך, הרי שהאנרגיה הדרושה לאדות מים לאדים באותה טמפרטורה (latent heat of vaporization) גדולה מאוד.

תכולת אדי מים [g/kg]	לחות יחסית [%]	אנתלפיה [kJ/kg]
0	0	25.0
5	25	37.6
10	50	50.4
15	75	62.9
20	100	75.5

טבלה 6.6. השפעת תכולת אדי המים על האנתלפיה של אוויר בטמפרטורה של 25 מעלות.

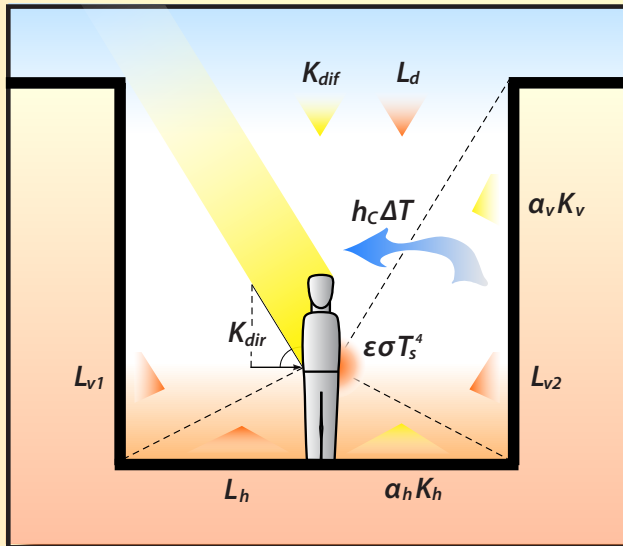
חום סגולי של אוויר יבש (בטמפרטורה * 10°C)	1.01 kJ/kg $^{\circ}\text{C}$	0.24 kcal/kg $^{\circ}\text{C}$
חום סגולי של מים (בטמפרטורה * 4°C)	4.18 kJ/kg $^{\circ}\text{C}$	1.00 kcal/kg $^{\circ}\text{C}$
חום האידי	2,257 kJ/kg	540 kcal/kg

טבלה 6.5. חום סגולי וחום האידי של מרכיבי האוויר

* החום הסגולי מושפע במידה מסוימת מטמפרטורת החומר.



7. מיקרו-אקלים בחלל עירוני



איור 7.1. החלפת אנרגיה בין גוף האדם לסביבה הבנויה.

קרינת שמש ישירה

בשעות שבהן האדם עלול לסבול מעומס החום המשמעותי ביותר (כלומר שעות היום בעונה החמה), הגורם העיקרי המשפיע על מאזן האנרגיה הנו קרינת השמש (קרינה קצרת-גלים). קרינה קצרת גלים זו גורמת להתחממות האדם באופן ישיר, כאשר היא נבלעת ע"י הגוף, ובאופן עקיף כאשר היא נבלעת ע"י משטחים בסביבה שמתחממים כתוצאה מכך.

הגוף חשוף לקרינה ישירה בהתאם לגיאומטריה התלת-מימדית של החלל העירוני וכל מרכיביו (כגון קירות מבנים, עצים וכו'), ושל המיקום היחסי של השמש (בהתאם לשעת היום, יום השנה וקו הרוחב של המקום).

ניתן כמובן להקטין את חשיפת הגוף לקרינה ישירה בקיץ באופן מכוון, תוך שימוש בעצי צל ואלמנטי פיתוח (כגון פרגולות, סככות וכו') אשר ייעודם התכנוני להצל. בתכנון ובחירה של אלמנטי הצללה, יש להתחשב בין היתר בתכונות החומרים:

- **סוגי עצים** וצמחייה מטפסת, כולל מידות, מקדמי העברה של קרינת שמש, זמני נשירה ועמידות
- תכונות של חומרי הצללה, כולל תכונותיהם האופטיות והתרמיות

אדם הנמצא בשטח חוץ מבונה חשוף לתנאים שונים במהותם מאשר אדם בתוך בניין. ניתן לתאר את המיקרו-אקלים בחלל עירוני, אשר משפיע על **הנוחות התרמית** של האדם בתוכו, באמצעות מאזן האנרגיה בין גוף האדם לבין סביבתו העירונית.

מאזן זה כולל שני תהליכים עיקריים שבהם האדם מתחמם או מתקרר כתוצאה מתכונות החלל: קרינה (מהשמש ומהסביבה הקרובה) והסעה (התלויה בטמפרטורת האוויר ובמהירות זרימתו). את המאזן הכולל ניתן לחשב באמצעות המדד לעומס תרמי.

1. קרינה

ניתן לכמת את מאזן הקרינה בין גוף האדם לבין סביבתו הבנויה באמצעות חישוב של השטפים השונים (כולם בוואט למ"ר של פני הגוף), כאשר R_n מייצג את רווח האנרגיה בקרינה של הגוף (ראה איור 7.1):

$$R_n = (K_{dir} + K_{dif} + K_h + K_v)(1 - \alpha_s) + L_d + L_h + L_v - L_s$$

המאזן מורכב מקרינת שמש ומקרינה ארוכת גלים:

K_{dir} – קרינת שמש ישירה על פני הגוף

K_{dif} – קרינת שמש מפוזרת בשמיים על פני הגוף

K_h – קרינת שמש מוחזרת ממשטחים אופקיים על פני הגוף

K_v – קרינת שמש מוחזרת ממשטחים אנכיים על פני הגוף

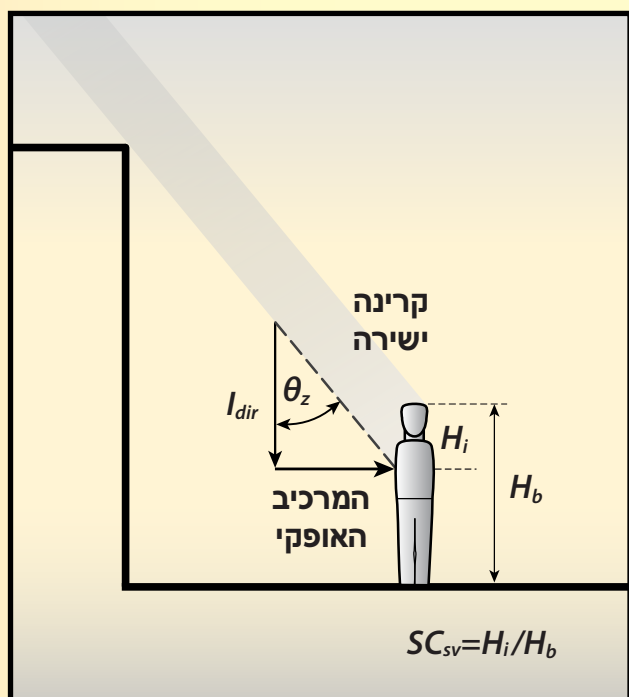
α_s – מקדם ההחזרה (albedo) של הגוף

L_d – קרינה ארוכת גלים הנפלטת מכיפת השמיים

L_h – קרינה ארוכת גלים הנפלטת ממשטחים אופקיים

L_v – קרינה ארוכת גלים הנפלטת ממשטחים אנכיים

L_s – קרינה ארוכת גלים הנפלטת מהגוף



בנוסף, יש השפעה מכרעת של צפיפות הבנייה – כאשר היא נמדדת במדדים התלת-ממדיים כגון יחס גובה-רוחב (H/W) של רחוב – על חלקו היחסי של השטח הפתוח שבו הולכי רגל יהיו מוצלים על ידי הבניינים הגובלים בו. באופן כללי, מרקם עירוני "קומפקטי" שמתאפיין בחללים בעלי H/W גבוה מכיל יותר שטח פתוח מוצל מאשר מרקם דליל ומפוזר. אולם הקשר בין "קומפקטיות" והצללה תלוי גם בצורת החלל בתכנית, או במקרה של רחוב, בהפניית ציר האורך שלו.

ניתן לחשב את החשיפה לקרינה ישירה (K_{dir}) של הולך רגל ברחוב, אשר מיוצג כגוף פשוט בצורת גליל אנכי:

$$K_{dir} = I_{dir} \left(\frac{\tan \theta_z}{\pi} SC_{sv} + SC_{sh} \right)$$

כאשר החשיפה תלויה בגורמים הבאים (איור 7.2):

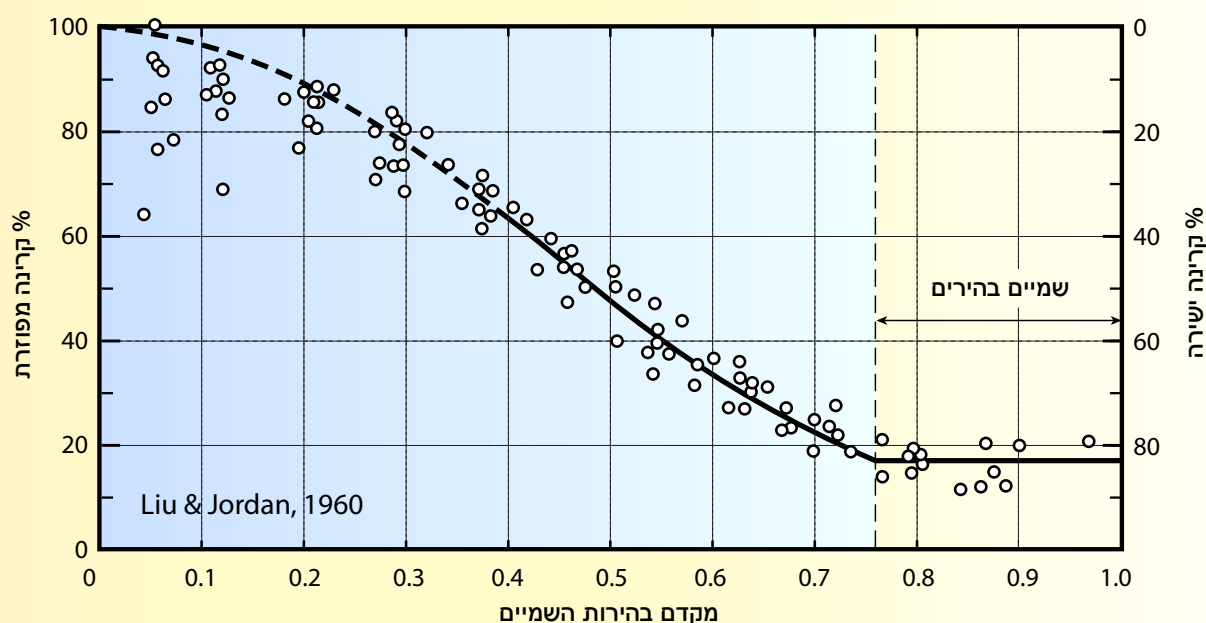
I_{dir} – עוצמת הקרינה הישירה על פני משטח אופקי, בהתאם לשעה ולעונה, למיקום הגיאוגרפי, ולתנאי מזג האוויר (בשמיים בהירים הקרינה הישירה שווה ל-80 עד 85% מסה"כ קרינת השמש הגלובאלית שנמדדת על פני מישור אופקי - ראה איור 7.3)

θ_z – זווית הפגיעה של קרני השמש במשטח האנכי

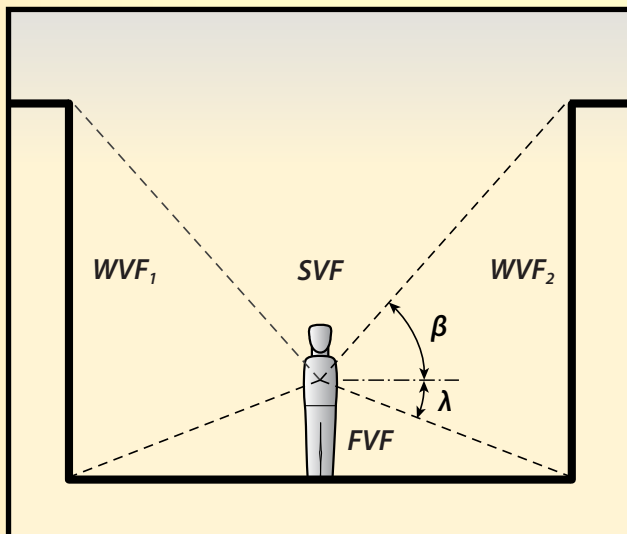
איור 7.2. החשיפה של גוף האדם לקרינה ישירה בקרבת בנין.

של הגוף, בהתאם לזווית הגובה של השמש באותו זמן ומיקום

ו- SC_{sh} – מקדמי ההצללה (השטח האנכי והאופקי החשופים לקרינה ישירה יחסית לסה"כ שטח



איור 7.3. הקשר בין קרינה ישירה ומפוזרת כחלקים של סה"כ קרינת השמש, ורמת הבהירות של השמיים.



איור 7.4. גזרות חשיפה של הולך רגל ברחוב.

α_h – מקדם ההחזרה (albedo) של המשטח האופקי (ריצוף, אדמה וכו'), בהתאם לצבע החומר ורמת החספוס שלו. ערכים אופייניים של חומרי ריצוף וכיסוי קרקע מופיעים בטבלה 6.1 בפרק 6.

$\overline{FVF}$ – גזרת החשיפה למשטח האופקי (Floor View Factor) הממוצע של הגוף (ראה איור 7.4):

$$\overline{FVF} = (\cos \lambda) / 2$$

$$\lambda = \tan^{-1}(1 / 0.5W)$$

ועבור משטח אנכי (מחושב לכל קיר בקניון בנפרד):

$$K_v = I_{dir} \left(\frac{\tan \theta_z \cos \varphi}{2} \right) SC_v \alpha_v + \overline{WVF}$$

φ – הזווית האופקית בין זווית הצידוד של השמש (azimuth) והאנך של המשטח האנכי. זווית הפגיעה תלויה בזמן ומיקום, וגם בהפנייתו של הקיר – SC_v – מקדם ההצללה (השטח האנכי החשוף לקרינה ישירה יחסית לסה"כ השטח האנכי)

α_v – מקדם ההחזרה (albedo) של המשטח האנכי (קירות של מבנים וכו'), בהתאם לצבע החומר ורמת החספוס שלו. ערכים אופייניים של חומרי גמר נפוצים מופיעים בטבלה 6.1 בפרק 6.

$\overline{WVF}$ – גזרת החשיפה (Wall View Factor) הממוצע של הגוף אל משטח האנכי (ראה איור 7.4):

הגוף), בהתאם לגיאומטריה השמש ולגיאומטריה של החלל העירוני

איורים 12.2 ו-12.3 בפרק 12 ממחישים את הקשר בין צורת הבנייה וחשיפתם של הולכי רגל לקרינת שמש ישירה, בעונת הקיץ (ניתוח זה מתייחס לקו רוחב $30^\circ N$). כאשר הרחוב מכונן לאורך ציר צפון-דרום, החשיפה יורדת באופן משמעותי עם ציפוף הקניון (עליה ביחס H/W), בשעות הבוקר ואחה"צ. אולם כאשר כיוונו של ציר הרחוב מזרחי-מערבי, חתך הקניון משפיע פחות על חשיפת האדם בתוכו.

קרינת שמש בלתי ישירה

הולך רגל בתוך קניון עירוני חשוף גם לקרינה מפוזרת בשמיים (K_{dif}):

$$K_{dif} = I_{dif} \overline{SVF}$$

כאשר החשיפה תלויה בגורמים הבאים:

I_{dif} – עוצמת הקרינה המפוזרת בשמיים, הנמדדת בשטח הפתוח (בשמיים בהירים שווה ל-15-20% מקרינת השמש הגלובאלית - ראה איור 7.3)

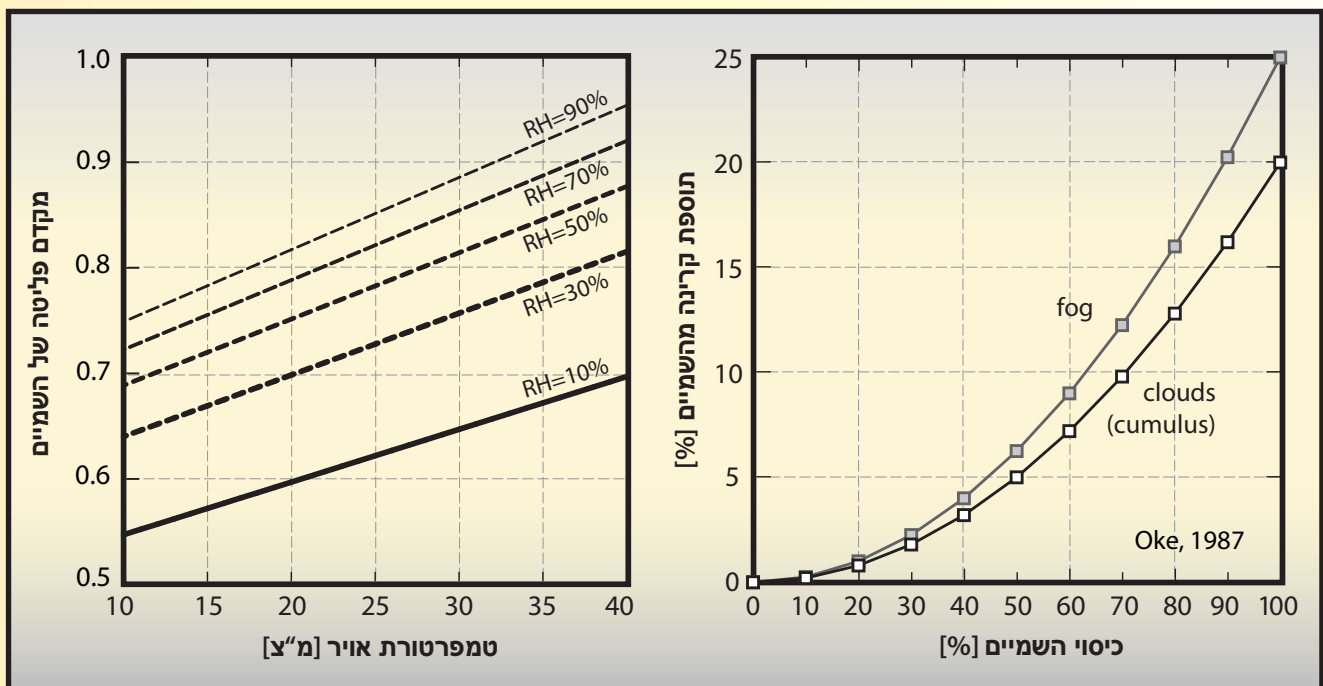
$\overline{SVF}$ – גזרת החשיפה לשמיים (Sky View Factor) הממוצע של הגוף - לנוחיות ניתן לחשב את ה- SVF (ראה נוסחה בפרק 4) מגובה 1.0 מ' מעל פני הקרקע (ראה איור 7.4)

קרינת שמש שמוחזרת ממשטחים בחלל מחושבת כמכפלה של מקדם ההחזרה (albedo) של המשטח, וחשיפת המשטח עצמו לקרינה ישירה. החזרות ממשטחים נחשבים למקורות קרינה מפוזרת, ועל כן נלקחות בחשבון גם גזרות החשיפה של המשטחים, הנמדדות מהגוף. עבור משטח אופקי:

$$K_h = I_{dir} SC_h \alpha_h \overline{FVF}$$

I_{dir} – עוצמת הקרינה הישירה על פני משטח אופקי (ראה קרינה ישירה לעיל)

SC_h – מקדם ההצללה (השטח האופקי החשוף לקרינה ישירה יחסית לסה"כ השטח האופקי)



איור 7.5. התלות של פליטת קרינה ארוכת גל מהשמיים בלחות (שמאל) ובערפל ועננים (ימין).

ε_a – מקדם פליטה (emissivity) של השמיים, אשר בתנאים בהירים ניתן לחשב על פי לחץ האדים (e_a):

$$\varepsilon_a = 1.24 \left(\frac{e_a}{T_a} \right)^{1/7}$$

את מקדם הפליטה של השמיים ניתן להעריך גם על פי הטמפרטורה והלחות היחסית של האוויר בעזרת איור 7.5. באופן כללי, ערך המקדם נע בין 0.75 ל-0.85 ועולה עם תכולת אדי המים של האוויר. פליטת הקרינה מוגברת כאשר השמיים אינם בהירים, כפי שמוצג באיור 5.5: בתנאים של עננות חלקית התוספת הנה שולית (כ-5% עליה בקרינה ב-50% כיסוי), אבל בערפל כבד התוספת מגיעה ל-25%.

σ – מקדם סטפן-בולצמן
($5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

T_a – טמפרטורת האוויר במעלות בסולם קלווין [K]

$\overline{SVF}$ – גזרת החשיפה לשמיים (ראה לעיל)

הקרינה הנספגת ממשטח אופקי כגון פני האדמה או ריצוף (L_h) מחושבת כ:

$$L_h = \varepsilon_h \sigma T_h^4 \overline{FVF}$$

$$\overline{WVF} = \frac{1 - (\overline{SVF} + \overline{FVF})}{2}$$

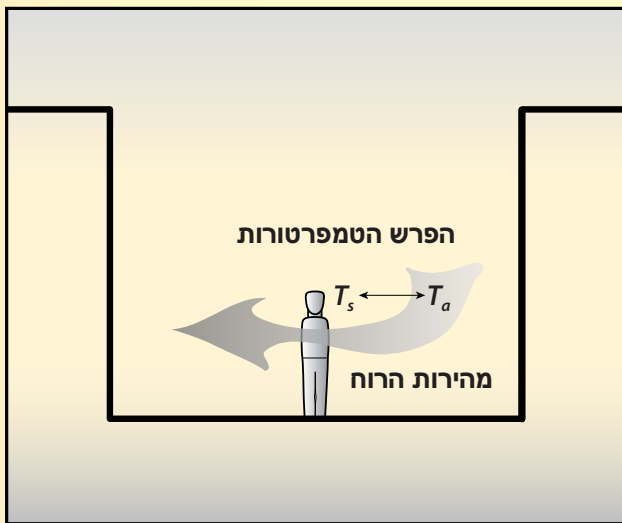
החישוב של חשיפת קירות לקרינה ישירה, מעבר ליישומו הקשור למיקרו-אקלים של שטחי חוץ, הנו חשוב גם מבחינת האקלים הפנימי של הבניין ובקביעת נגישות השמש לחזיתות בחורף.

בפועל הגוף בולע קרינה קצרת-גלים בהתאם לחשיפתו למרכיבים הישירים ובלתי ישירים המתוארים לעיל, וגם לכושר הבליעה (בהתאם למקדם ההחזרה α_s של העור והבגדים). בתנאי קיץ חמים ניתן להעריך שהולכי רגל לובשים בגדים קלים ושרוב הקרינה נבלעת בעור על פי מקדם החזרה (albedo) של $\alpha_s = 0.35$ בקירוב.

קרינה ארוכת גלים

אדם בחלל עירוני חשוף לקרינה ארוכת גלים שנפלטת מהשמיים (L_d), מפני הקרקע האופקיים (L_h), ומקירות אנכיים (L_w), כאשר מידת החשיפה תלויה בטמפרטורות האלמנטים וגזרות החשיפה אליהם. הקרינה הנספגת מהשמיים מחושבת כ:

$$L_d = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \overline{SVF}$$



איור 7.6. מרכיבים של מעבר חום בהסעה בין גוף האדם לסביבה העירונית.

h_o – מקדם מעבר חום בהסעה וקרירה מהמשטח^[7]
ניתן להעריך את ערכו כ: $h_o = 3.8 + 1.8V$ (V = מהירות הרוח)

קרירה ארוכת גלים גם נפלטת מגוף האדם אל הסביבה:

$$L_s = \varepsilon_s \sigma T_s^4$$

כאשר ε_s – מקדם הפליטה של הגוף (כ-0.9); σ – מקדם סטפן-בולצמן; T_s – טמפרטורת הגוף [K].

בתנאי קיץ ניתן להניח שהולכי רגל לובשים ביגוד קל, וטמפרטורת העור היא כ-35 מ"צ (כ-308 קלווין).

2. הסעה

בנוסף לקרירה, הולכי הרגל מחליפים חום עם הסביבה העירונית באמצעות הסעה. ברוב המקרים כיוונו של מעבר החום הנו מהגוף אל הסביבה, וקצב איבוד החום בהסעה (C) תלוי בעיקר בטמפרטורה ומהירות הזרימה של האוויר הבא במגע עם הגוף [$W m^{-2}$] (ראה איור 7.6):

$$C = h_c (T_s - T_a)$$

h_c – מקדם מעבר החום בהסעה [$W m^{-2} ^\circ C^{-1}$]
 T_s – טמפרטורת הגוף (כ-35 מ"צ)

ε_h – מקדם הפליטה (emissivity) של המשטח האופקי (עבור רוב החומרים כ-0.9 כפי שמוצג בטבלה 6.1 בפרק 6)

σ – מקדם סטפן-בולצמן (ראה לעיל)

T_h – טמפרטורת המשטח האופקי [K]

$\overline{FVF}$ – גזרת החשיפה אל המשטח האופקי

הקרירה הנספגת ממשטח אנכי (L_v) כגון קיר של מבנה מחושבת (עבור כל קיר בנפרד) כ:

$$L_v = \varepsilon_v \sigma T_v^4 \overline{WVF}$$

ε_v – מקדם הפליטה (emissivity) של המשטח האנכי (ראה טבלה 6.1 בפרק 6)

σ – מקדם סטפן-בולצמן (ראה לעיל)

T_v – טמפרטורת המשטח האנכי [K]

$\overline{WVF}$ – גזרת החשיפה אל המשטח האנכי

במקרים רבים, טמפרטורת פני השטח של משטחים אופקיים (T_h) ואנכיים (T_v) קרובה לטמפרטורת האוויר בחלל העירוני. אולם כשמשטחים אלה חשופים לקרירה ישירה, הם עלולים להתחמם באופן משמעותי. ניתן להעריך את הטמפרטורה הקרינתית של פני שטח נתון ($T_{sol-air}$) תוך התייחסות לטמפרטורה של האוויר הסמוך ומהירות תנועתו, ולקרירה הנבלעת ע"י המשטח:

$$T_{sol-air} = T_a + \frac{(K_{abs} - \Delta L)}{h_o}$$

T_a – טמפרטורת האוויר הסמוך למשטח [מ"צ]

K_{abs} – קרינת שמש ישירה נבלעת ע"י המשטח [W] (m^{-2}) (ראה הגדרות בדיון על חשיפת משטחים לעיל)
עבור משטח אופקי:

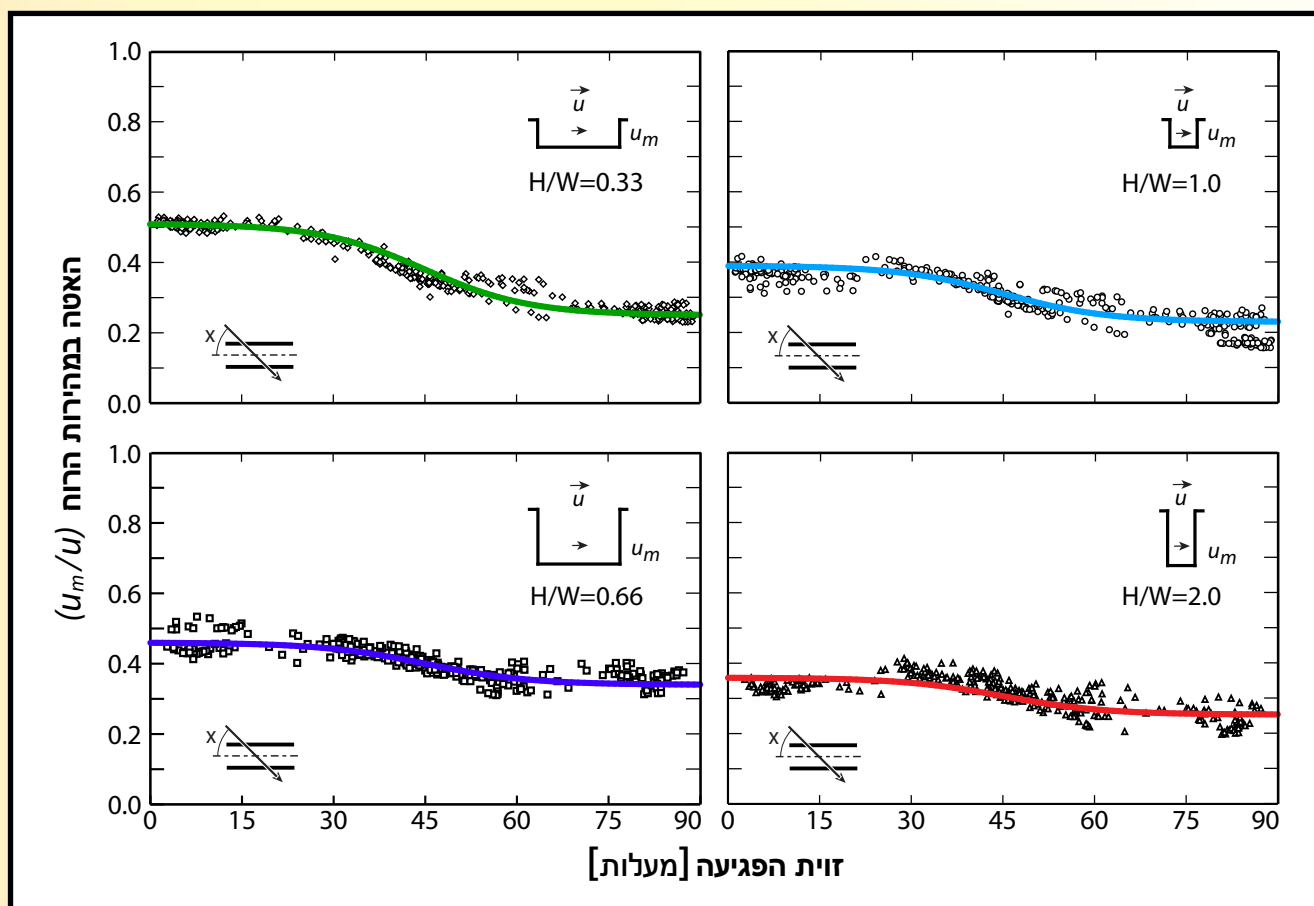
$$K_{abs} = (1 - \alpha_h) I_{dir} SC_h$$

ועבור משטח אנכי:

$$K_{abs} = (1 - \alpha_v) (\tan \theta_z \cos \phi) I_{dir} SC_v$$

ΔL – מאזן הקרירה ארוכת-הגלים של המשטח [$W m^{-2}$] (בקניון עירוני צפוף ניתן להזניח)

7. Clark and Berdahl, 1980



איור 7.7. הקשר בין האטה הרוח וצורת הרחוב, מבחינת חתכו (יחס גובה לרוחב) וכיוון צירו יחסית לכיוון הרוח.

ניתן להעריך את מהירות הרוח בתוך קניון עירוני, כחלק יחסי מהזרימה החופשית מעל החופה העירונית. שעור ה"האטה" במהירות הרוח תלוי גם בחתך הרחוב (H/W) וגם בכיוונו, כאשר באופן כללי הרוח נחלשת ככל ש- H/W גבוה וציר הרחוב ניצב לכיוון הזרימה. באיור 7.7, ניתן להבחין ביחס בין האטה הרוח ו"זווית הפגיעה" עבור מספר חתכי רחוב.

3. לחות ועומס חום

בנוסף לקרינה וחום שמועבר בהסעה, התהליך של אידיוי הזיעה מהגוף משפיע על נוחות האדם בתנאים חמים – ואופן ההשפעה קשור גם הוא לתכונות של החלל העירוני. למשל השימוש בצמחייה ומים – שמורידים את טמפרטורת האוויר בחלל – כאמצעי לקירור באידיוי עלול גם להגביל את היכולת של הגוף להתקרר, משום שהאידיוי מהם מעלה את הלחות היחסית.

8. Mitchell, 1974

T_a – טמפרטורת האוויר (מ"צ)

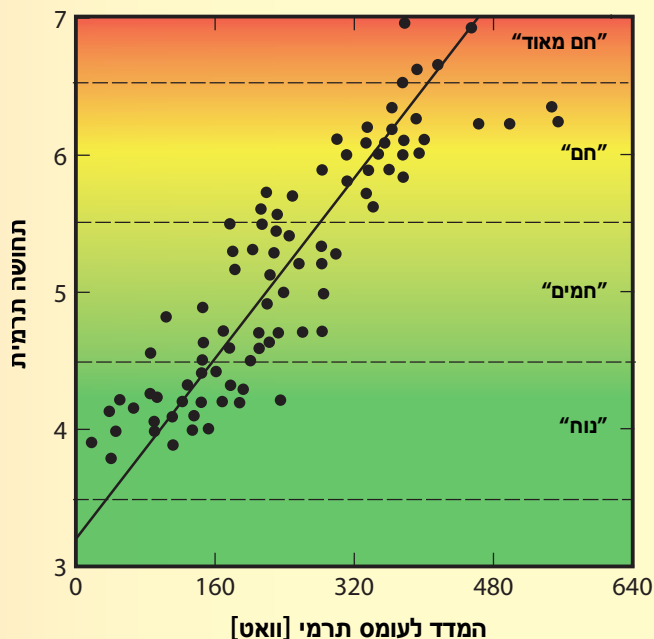
המקדם h_c מחושב על פי מהירות הרוח (V):

$$h_c = 8.3 V^{0.6}$$

כאשר המהירות $[m s^{-1}]$ נמדדת בגובה של אדם עומד, ובהנחה שהוא מיוצג ע"י גוף גלילי אנכי בקוטר 0.17 מטר.^[8]

טמפרטורת האוויר ברחוב, כאמור לעיל, מושפעת מהתכונות של המרקם העירוני (תופעת אי החום) ומהתכונות של החלל עצמו. ניתן להעריך את הטמפרטורה ברחוב על בסיס מדידות מעל החופה העירונית או מתחנה מטאורולוגית קרובה.

מהירות הרוח נוטה להיות יותר נמוכה בתוך המרקם העירוני מאשר זו שנמדדת מעל החופה העירונית או בשטח הפתוח. הזרימה גם יותר טורבולנטית, דהיינו השתנותה בזמן ובמרחב גדולה – גם מבחינת מהירותה וגם מבחינת כיוונה.



איור 7.8. הקשר בין המדד לעומס תרמי (ITS) בסביבה ורמת התחושה של אי-נוחות בתנאים חמים.

4. עומס תרמי ותחושת הנוחות

בתנאים חמים, ניתן להבחין בקשר בין ערכי המדד לעומס תרמי ותחושת הנוחות התרמית, כדוגמת איור 7.8, כאשר ה"גבול" בין תחושת נוחות לאי-נוחות נמצא בקירוב ב-160 וואט (כממוצע באוכלוסיות שנבדקות). גבול זה כמובן משתנה בהתאם לפעילות ותכונות אישיות רבות. באיור 7.8, ניתן לראות שכל תוספת של 120 וואט מסמן מעבר לקטגוריה אחרת של תחושה ("חמים", "חם" ו"חם מאוד"). בהתאם לקשר הנ"ל, מוצג תאור של תחושת הנוחות ברחובות עירוניים בעלי מאפיינים שונים באיור 4.12 בפרק 12, בתנאי הנגב הצפוני בעונת הקיץ.^[10]

חשוב לציין שבתנאים קרים, מאזן האנרגיה של הגוף מחושב משטפי הקרינה, ההסעה וייצור החום הפנימי, ללא צורך במקדם האידוי. בפועל, הקשר בין מאזן האנרגיה ותחושת הנוחות בתנאים קרים תלוי באופן מכריע באופי הביגוד – ובמיוחד הבידוד התרמי שהוא מעניק לגוף.

בתנאי סביבה חמים, התאדות של זיעה מהעור גורמת לקירור הגוף, הדרושה כדי לסלק עודפי החום הנקלטים מבחוץ והנוצרים בתוך הגוף. יעילותו של הקירור מוגבלת ע"י הלחות באוויר, ויורדת ככל שהאוויר לח יותר. ניתן להעריך את יעילות הקירור באידי של הגוף (f) בהתאם לתכונות האוויר:^[9]

$$\frac{1}{f} = \exp [0.6 \left(\frac{E}{E_{max}} - 0.12 \right)]$$

E – סה"כ עומסי החום על הגוף, כתוצאה מקרינה, הסעה, וייצור חום פנימי (מטבולי) בתוך הגוף

E_{max} – יכולת האידוי של האוויר, ביחידות של חום כמוס (kcal h^{-1}):

$$E_{max} = pV^{0.3} (42 - P_{V_a})$$

p – מקדם ביגוד (20.5 עבור בגדי קיץ קלים)

V – מהירות הרוח על פני הגוף (m s^{-1})

P_{V_a} – לחץ האדים של האוויר (mm Hg), שניתן לחשב מהטמפרטורה והלחות היחסית

השימוש בערך (f) לצורך התיאור של הנוחות התרמית הכוללת בחלל נתון נעשה באמצעות המדד לעומס תרמי (Index of Thermal Stress – ITS), בו משולבים כל מרכיביו של מאזן האנרגיה (ביחידות של וואט על פני כל שטח הגוף):

$$ITS = 1/f (M - W \pm R_n \pm C)$$

M-W – ייצור חום פנימי בגוף [M], פחות האנרגיה המושקעת בעבודה [W] (כ-70 וואט במצב של עמידה)

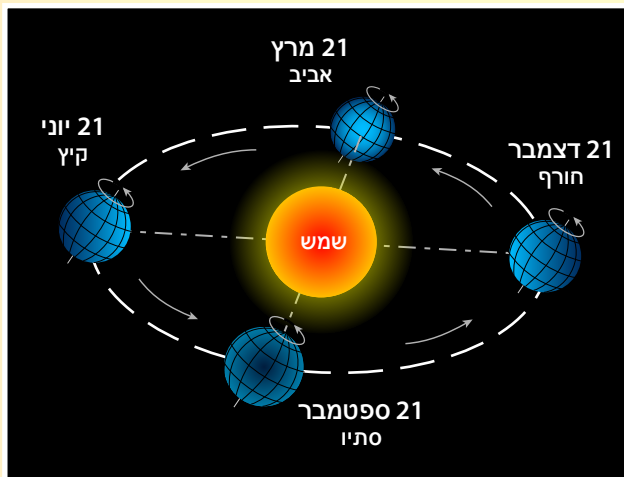
R_n – מאזן הקרינה [וואט]

C – מאזן החלפת החום בהסעה [וואט]

כדי לתרגם את שטפי האנרגיה בקרינה והסעה (המחושבים בוואט למ"ר) לשטפים בוואט עבור כל הגוף, ניתן להכפיל בשטח הגוף על פי מספר DuBois (כ-1.7 מ"ר עבור מבוגר ממוצע).

9. Givoni 1976

10. Pearlmutter et al., 2007a



איור 8.1. תנועת כדור הארץ סביב השמש.

8. גאומטריית שמש

1. מבוא

קרינת השמש מהווה מרכיב עיקרי במאזן האנרגיה בבניינים. בין אם מדובר באנרגיה רצויה, התורמת לחימום הבניין בחורף, ובין אם מדובר באנרגיה המגדילה את עומס החום על הבניין בקיץ – לא ניתן להתעלם מהשפעתה. הקושי העומד בפני המתכננים בהתייחס לקרינת השמש נעוץ בעובדה שעוצמתה משתנה כתלות בזמן ובמרחב, והמעשה האדריכלי חייב להביא זאת בחשבון.

2. תנועת כדור הארץ במערכת השמש

כדור הארץ הינו כוכב לכת בעל קוטר של 12,700 ק"מ בקירוב, המקיף את השמש בתנועה מעגלית במרחק של כ-150 מיליון ק"מ (איור 8.1). (למעשה, התנועה הינה מעט אליפטית, והמרחק של כדור הארץ מן השמש נע בין כ-147 מיליון ק"מ ב-1 בינואר ל-152 מיליון ק"מ ב-1 ביולי). הקפה שלמה של השמש אורכת 365.26 ימים. מאחר ועל פי הלוח ישנם רק 365 ימים בשנה, נהוג להוסיף יום אחד מדי ארבע שנים (שנה מעוברת), ויום אחד נוסף פעם במאה שנים בכדי לפצות על ההפרש הנותר.

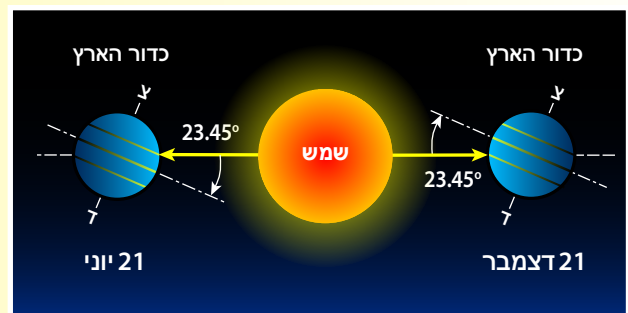
3. סיבוב כדור הארץ סביב צירו

מלבד התנועה סביב השמש, סובב כדור הארץ גם סביב צירו. משך הסיבוב הינו 24 שעות, ומהלך של סיבוב שלם מכונה יממה. ציר הסיבוב של כדור הארץ איננו ניצב למישור שבו סובב כדור הארץ את השמש, אלא נטוי ביחס אליו בזווית של 23.45 מעלות. זווית זו קבועה במרחב, ואינה משתנה במהלך סיבוב כדור הארץ סביב השמש (ראה איור 8.2).

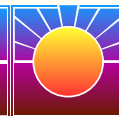
לנטייה של ציר הסיבוב ישנה השפעה מכרעת על הזמינות והעוצמה של קרינת השמש במקומות שונים על פני כדור

הארץ, והיא אף הגורם להופעת עונות השנה.

- כאשר במהלך ההקפה פונה חצי הכדור הצפוני כלפי השמש, שורר בחצי הכדור הזה קיץ, בעוד שבחצי הכדור הדרומי שורר באותה עת חורף.
 - כאשר במהלך ההקפה פונה חצי הכדור הדרומי כלפי השמש, שורר בחצי הכדור הזה קיץ, בעוד שבחצי הכדור הצפוני שורר באותה עת חורף.
 - עונות המעבר (אביב וסתיו) מתרחשות כאשר שני חצאי כדור הארץ חשופים לשמש במידה דומה.
- הזווית בין קרני השמש ופני כדור הארץ בנקודה כלשהי משפיעה על שטף הקרינה הפוגע בקרקע במספר אופנים:
- מאחר והאוויר אינו שקוף לחלוטין לקרינת השמש, חלק ממנה נבלע באטמוספירה. ככל שהמסלול שעל הקרניים לעשות באטמוספירה ארוך יותר, כך גדלה הבליעה וקטנה עוצמת הקרינה הנמדדת בסופו של דבר על פני הקרקע. המסלול הקצר ביותר מתרחש כאשר הקרניים פוגעות בניצב לפני הקרקע.



איור 8.2. הזווית בין ציר הסיבוב של כדור הארץ לבין מישור התנועה שלו סביב השמש.

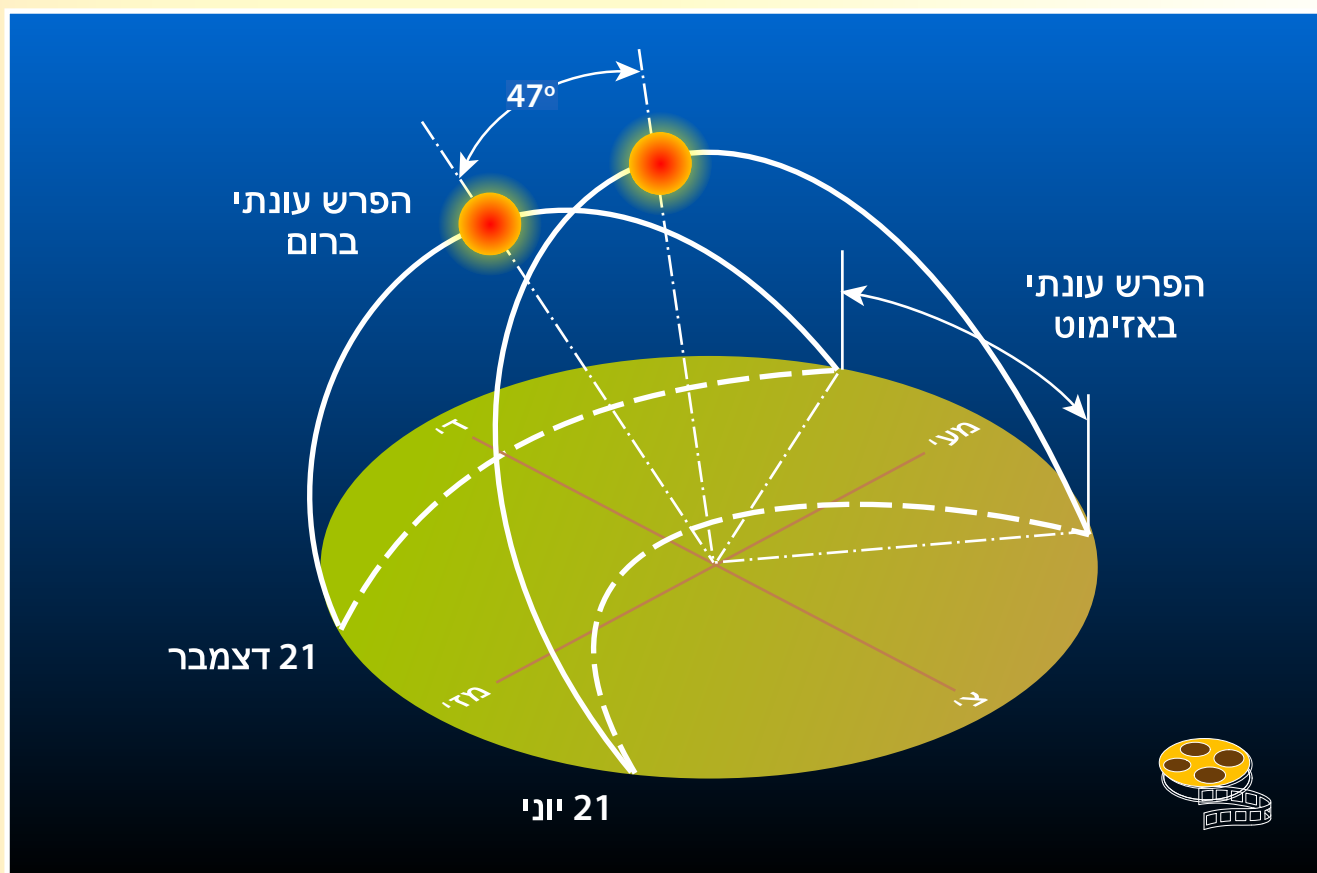


- את עוצמת קרינת השמש נהוג למדוד במישור הניצב לכיוון הקרניים. כאשר הקרינה אינה פוגעת בניצב לפני השטח, הקרניים מאירות שטח גדול יותר, ולכן שטף הקרינה נמוך יותר בהתאמה. הירידה בעוצמת הקרינה הינה יחסית לקוסינוס הזווית בין המישור לבין הקרניים. כאשר הקרינה ניצבת למישור, כלומר זווית הפגיעה הינה 90 מעלות, יהיה קוסינוס הזווית שווה ל-1, ולא תהיה הפחתה בשטף הקרינה המתקבל.

3. "מסלול השמש" ביחס לצופה על פני הארץ

לצופה הנמצא על פני כדור הארץ נראה כאילו השמש נעה סביבו. כפי שתואר לעיל, התנועה היחסית הזו נובעת מסיבוב כדור הארץ סביב צירו וממהלך סיבובו סביב השמש. אולם מן הבחינה המעשית נוח יותר לתאר את התנועה על פי המיקום היחסי של השמש, כאשר מניחים שהצופה הוא נייה, הקרקע היא מישורית ואילו כיפת הרקיע מתוארת על ידי חצי כדור. את המיקום היחסי של השמש (להלן: "מיקום השמש") ניתן אפוא לתאר על ידי שתי זוויות (איור 8.3):

- רום (altitude) – הזווית שבין קרני השמש והמישור האופקי (נמדדת במישור אנכי)
- אזימוט (azimuth) – הזווית האופקית שבין השמש לבין הצפון הגיאוגרפי, הנמדדת עם כיוון השעון. כלומר, מזרח = 90° , דרום = 180° , מערב = 270° וצפון = 360° .
- את מסלול השמש ביחס לצופה על פני כדור הארץ ניתן לתאר בצורה גרפית במספר שיטות. בשיטה הנפוצה ביותר מתואר הרום מעל האופק על ידי מעגלים קונצנטריים במרחקים שווים והכיוון ביחס לצפון על ידי קווים רדיאליים היוצאים ממרכז המעגל. מהלך השמש מתואר על ידי עקומה אופיינית לכל יום בשנה, אולם מטעמי נוחיות נהוג לציין יום אחד בלבד בכל חודש. את שאר הימים ניתן למצוא על ידי אינטרפולציה.



איור 8.3. תנועת השמש ברקיע, כפי שהיא נראית לצופה על הקרקע בקיץ ובחורף (ראה תרשים של מסלול השמש).



9. בריאות ואיכות אויר פנים

איכות סביבת הפנים של בניינים אלה בעייתית בלשון המעטה. איכות האוויר ירודה בשל סחרור של אוויר חוזר לחיסכון במיזוג אוויר טרי, והספקת אוויר טרי דרך מסננים ותעלות לא מתוחזקים כיאות, מהם נפוצים מזהמים וחיידקים. במקרים מסוימים מהוות המערכות המכניות למיזוג ולהספקת האוויר בית גידול של מפיצי מחלות כגון *Legionella pneumophila*, ומעודדות גידול והפצת נבגים של *Stachybotrys chartarum*, *Penicillium* ועוד, המזהמים כאלרגנים והמשפיעים על מערכת הנשימה. אך בראש ובראשונה, מערכות מכניות למיזוג ואוורור קשורות בשיעול, כאבי גרון, הצטננויות ועוד תופעות הקשורות בהפעלתן גם כשהמסננים והתעלות תקינים ומתוחזקים כנדרש. מחקרים הצביעו על שכיחות גבוהה בהרבה של SBS בבנייני משרדים בעלי מערכות מיזוג אוויר ואוורור מכני מאשר בבנייני משרדים המאווררים באופן טבעי.^[16,15]

איכות הסביבה הפנימית נמדדת על ידי פרמטרים שונים, ביניהם **נוחות תרמית**^[17], **ויזואלית**^[18], אקוסטית^[19], ריכוז מזהמים (כגון בנזנים, פורמלדהיד ופנולופתלמיד המשתחררים על ידי ריהוט, שטיחים, וחומרי גמר וניקוי שונים), ריכוז חלקיקים אורגניים מרחפים (Volatile Organic Compounds - VOC), גזים לרבות תחמוצות ודו-תחמוצת הפחמן, ריחות, שדות אלקטרו-מגנטיים ועוד^[20]. כל אלה תלויים בתכנון הבניין על פרטיו ומערכותיו. כך, למשל, יתכן כי הריצופים הקשיחים המקובלים בישראל משפרים את איכות הפנים לעומת שטיחים הלוכדים אבק ומתפרקים בעקבות חשיפתם לקרינה אולטרא-סגולית (UV), ולעומת זאת, אותם

תכנון בניין על מרכיביו, חומריו, מערכותיו ופרטיו קובע במידע גדולה את איכות החלל והאוויר בתוכו, ובכך משפיע על בריאות השוהים בו, על נוחותם ואף על יעילותם בעבודה.

תחום איכות אוויר וחלל הפנים של בניינים הנו רחב ומורכב, לעתים קשה להתייחסות כמותית, ובכל זאת חיוני כי המתכנן ייתן עליו דעתו. תחילת ההתייחסות השיטתית לעניין אי-שם באמצע שנות ה-70 של המאה ה-20, כאשר משבר הנפט הראשון הוביל לניסיון לבנות בניינים החוסכים אנרגיה בהיותם אטומים (ועל כן ממזערים את איבוד האוויר הממוזג). איטום זה של בניינים הביא לתופעות נלוות להספקת חמצן ולאווור לקויים, ולכליאת מזהמים שונים בתוך הבניין. תופעות אלה כוללות כאבי ראש, צריבת העיניים והריריות, שיעול יבש, חוסר יכולת ריכוז ועוד. כאשר תופעות אלה מתעוררות לאחר שהות בבניין ונעלמות זמן מה לאחר עזיבת הבניין, או לחילופין הן קיימות במהלך ימי העבודה אך נעלמות בסופי השבוע ובחופשות, אזי יש לפחות קשר נסיבתי ביניהן לבין הבניין עצמו. מגוון תופעות אלה כונה תסמונת הבניין החולה (Sick Building Syndrome - SBS) הגורמת אי-נוחות, תחלואה והיעדרות.^[13,12] במקרים מסוימים תתכן פגיעה בריאותית ארוכת טווח, ולפעמים אף בלתי הפיכה. מעבר לפגיעתם של כל אלה באיכות חייהם וברווחתם של העובדים, הם גם מסתכמים בעלויות של אובדן ימי עבודה וירידה בתפוקה, טיפול רפואי ותביעות לפיצויים.

במהלך שנות ה-70 המאוחרות ותחילת שנות ה-80 תוכננו בניינים בעלי מעטפת אטומה (לאוויר) לכאורה, ובה זיגוג שבחלקו הגדול קבוע ובלתי ניתן לפתיחה. בניינים אלה תלויים תלות מוחלטת במערכות מכניות למיזוג ולהספקת אוויר, שבלעדיהן אין ביכולתם של הבניינים לתפקד. אותן מערכות המנתקות את הפנים מן החוץ מאפשרות לייצר בניינים בעלי תכניות עמוקות, בהן הרוב (עובדים, דיירים, תלמידים) שוהים הרחק ממעטפת הבניין, אשר לא נחוצה כבר אפילו לשם הארת הפנים, המתבצעת באמצעים מלאכותיים.^[14]

12. Leyster and Boerstra, 2003

13. Tanabe, 2003

14. Roaf et al., 2005

15. Vincent et al., 1997

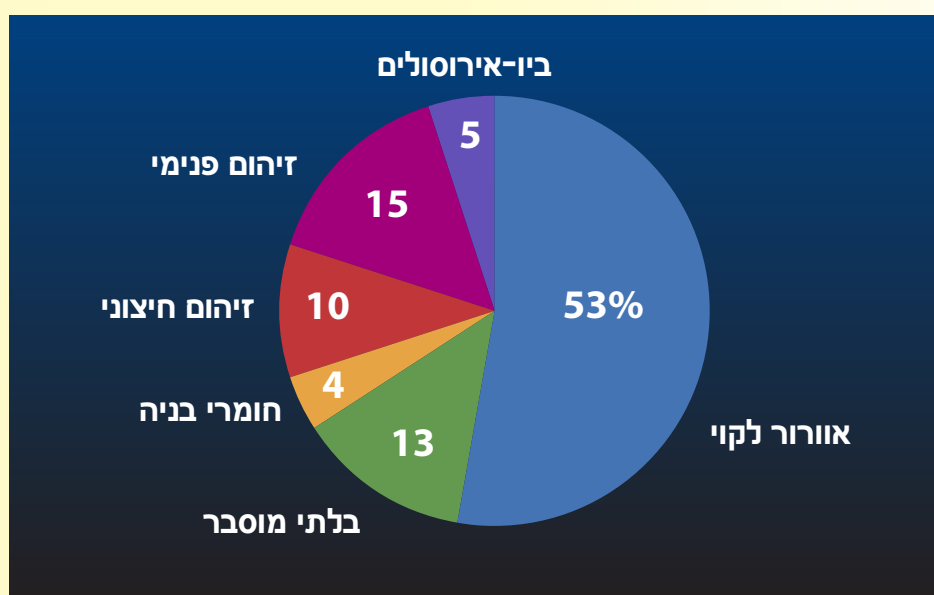
16. Bachmann and Myers, 1995

17. Tham and Willem, 2003

18. Veitch and Newsham, 2000

19. Leather et al., 2003

20. Niemelae et al., 2003



איור 9.1. גורמים של בעיות איכות אויר פנים. מקור: National Institute of Occupational Safety and Health

האוכלוסייה המבלה כ-90% מזמנו בבניינים, ועל כן מושפע מתכנונם האדריכלי, ומהתנאים התרמיים, הוויזואליים, האקוסטיים, ותנאי איכות האוויר הנוצרים בתוך הבניינים.

בעוד השלכותיה של התופעה בקרב עובדים ניתנות לאומדן במונחים של הפסדים כספיים, השלכותיה על סקטורים נוספים קשות לאומדן, ובמקרים רבים העדר התג הכספי לתופעה מרחיק את הנכונות לעסוק במחקרה. דוגמה מצוינת הנה מערכת החינוך על בנייניה, הסובלים מתסמינים דומים לאלה של בנייני המשרדים (ואף חמורים מהם בשל מספרי התלמידים הגדולים למטר רבוע של כיתה, ולרמה המטבולית הגבוהה של אלה ביחס לבוגרים), אך מעטים המחקרים העוסקים בכך.^[26] במקרים מעטים נערכו בארץ מחקרים בתחומים אלה בהקשר של בתי ספר ומוסדות חינוך,^[27] אך הנושא בעל חשיבות עליונה במיוחד בשל הקשר בין איכות אוויר החוץ לזו שבפנים. כפי שניתן לראות ממחקרים מקיפים הנערכים בעולם, ישנו קשר ישיר בין הקרבה של מוסדות

ריצופים וחומרי גמר קשיחים עלולים לעודד ולהגביר את רמות הרעש, לגרום בעיות אקוסטיות כה שכיחות בסביבה עתירת מחשבים וציוד אלקטרוני וחשמלי, ולגרום חשיפה למפלסי רעש גבוהים.

בחלק מהמקרים מקור תסמיני ה-SBS ניתן לזיהוי בקלות ומסתכם בתנאי נוחות תרמית, ויזואלית ו/או אקוסטית ירודה. לעיתים אף ניתן לזהות את מקור הבעיה כפסיכולוגי. מחקרים מן השנים האחרונות מצביעים על "נוחות נתפשת" הנובעת מ"שליטה נתפשת" (perceived control) על הסביבה ותנאיה. דוגמה לכך הנה קרבתו של עובד לחלון אשר ניתן לפתיחה – גם אם בפועל אינו מנצל אפשרות זו. תחושת הנוחות והביטחון הנגרמים על ידי האשליה של שליטה בסביבה המיידית, ועל ידי סיפוק הצורך בקשר עין עם החוץ ממחישה את חשיבות התכנון הנכון של הבניין.^[22,21] בעוד שישנם הבדלים בין קבוצות אוכלוסייה שונות על בסיס גיל או מגדר,^[23] מחקרים רבים בעולם המתועש מצביעים על עליה חוזרת בהרגשת הרווחה ובתפוקת העובדים ברגע שניתנת להם אפשרות שליטה ובקרה על סביבתם המיידית.^[25,24]

כוח העבודה בארצות המתועשות, וישראל ביניהן, מורכב מאחוז ניכר של עובדי משרדים, וכמחצית מהתוצר הלאומי הגולמי של אותן ארצות מקורו באותם סקטורים. עובדים אלה נמנים עם רוב

21. Jagemar and Fransson, 2004

22. Mahdavi and Unzeitig, 2005

23. Jagemar and Fransson, 2004

24. McCartney and Humphreys, 2002

25. Nishihara *et al.*, 2002

26. Heath and Mendell, 2002

27. Becker *et al.*, 2007



מספר מצומצם של חומרים הנושאים תו תקן ירוק, ויש צורך בבדיקה מדוקדקת של כל חומר ומוצר, תוך העדפה של חומרים טבעיים על פני חומרים סינתטיים, כאשר העדפה זו אפשרית.^[33,32]

התייחסות לתקנים והבנה בסיסית של התהליכים השונים עשויות לקדם תכנון והקמה של בניינים בריאים ונוחים. יחד עם זאת, בדיקת איכות אוויר הפנים אפשרית רק בדיעבד, לאחר השלמת הבנייה ואכלוס הבניין. בדיקות כאלה מכנים הערכת תפקוד הבניין לאחר אכלוסו (- Post-Occupancy Evaluation (POE), ויש להן שיטות עבודה שונות ומגוונות בהתאם למטרות הבדיקה.^[34] גישה זו הנה שונה ממהותו של המצב הנוכחי בישראל ומדינות אחרות בעולם, בהן אחריותו של המתכנן נגמרת עם סוף הבנייה. POE דורש קשר מתמשך בין המתכננים והיועצים השונים, הקבלן ובעלי המקצוע הנוספים, לבין הבעלים והמשתמשים של הבניין, זאת כדי להבטיח כי הדורש תיקון יתוקן, וכי יופקו הלקחים לשם הטמעתם בתכנון בבניינים הבאים.

28. ASHRAE, 1992

29. מת"י 2009: ת"י 5098 תכולת יסודות רדיואקטיביים טבעיים במוצרי בנייה

30. מת"י 2005א: ת"י 4175 חלק 1 שיטות פסיביות למדידת ריכוז גז ראדון: מבנים

31. מת"י 2005ב: ת"י 5281 בניינים שפגיעתם בסביבה פחותה ("בניינים ירוקים")

32. Pearson, 1989

33. Berman, 2001

34. Spengler et al., 2000

חינוך לכבישים עירוניים ראשיים לבין ריבוי מקרי הקצרת אצל ילדים הלומדים במוסדות אלה.

לא קיימים בישראל תקנים לאיכות אוויר פנים, וכאשר הנושא עולה נעשה שימוש בתקנים שונים מן העולם, כגון תקן 62-1989 של ASHRAE הקובע דרישות אוורור להבטחת איכות אוויר פנים קבילת.^[28] חשוב לתת את הדעת להגדרה זו, כי "קביל" אינו בהכרח טוב. תקן זה קובע ערכי ריכוז של דו-תחמוצת הפחמן בתוך מבנה כפונקציה של הריכוז של הגז בחוץ. נקודה זו עלולה להיות בעייתית במיוחד במקרה של בניינים פסיביים הממוקמים במרכזים עירוניים או באזורי תעשייה.

נקודות נוספות הדורשות התייחסות נוגעות לחומרי הבנייה והגמר השונים. בישראל ישנו תקן אחד העוסק בקרינה רדיואקטיבית של מוצרי בנייה,^[29] ותקן אחד הקובע בדיקת המצאות גז ראדון.^[30] לאחרונה הושק תקן נוסף – וולונטרי בינתיים – בנוגע לבניינים ירוקים.^[31] כל אלה ונוספים הנוגעים לרעש, הארה וכדומה, חיוניים להבטחת תפקודם הטוב של הבניינים תוך הבטחת בריאות השוהים בהם, אך אין די בהתייחסות אליהם. כך, למשל, דבקים משמשים בתעשיית הרהיטים משחררים גזים בריכוז גבוה במשך מספר חודשים (עד כחצי שנה לאחר השלמת הייצור של הרהיט) וניתן לשפר את איכות אוויר הפנים בבניין חדש על יד הקפדה על השארת הרהיטים במקום מאורר לפני הכנסתם לבניין. מאידך, שטיחים סינתטיים וציפויים שונים מתחילים לשחרר גזים וחלקיקים כתוצאה מתהליך הבליה הנגרם בין היתר על ידי חשיפה לקרינת שמש. לעת עתה ישנו בישראל

המלצה: תכנון הבניין צריך לאפשר תפקוד פסיבי (אוורור, תאורה, חימום וקירור) כאשר הדבר אפשרי מבחינת מיקומו במרקם העירוני ופנותו במגרש. אלה צריכים להיעשות תוך הקפדה על מניעת סנוור והתאמת תנאי הפנים לדרישות הנוחות התרמית. חומרי הבנייה והגמר צריכים להיות בעלי תו ירוק, ואם אין כאלה חשוב לבחור חומרים בקפידה תוך שימת דגש על המרכיבים שלהם והפליטות מהם. מערכות מכניות לחימום, קירור ואוורור דורשות קביעת נהלי אחזקה וניקוי למניעת הצטברות לכלוך והתפתחות פטריות במסננים ובתעלות. לבסוף, יש צורך בהערכת תפקוד הבניין לאחר אכלוסו כדי לזהות טעויות בתכנון ובבנייה ובעיות בתפעול, ולאפשר תיקון.



איור 10.1. התכנית האזורית לרובע קרונסברג בהנובר. העיקרון של התכנית היה לספק מגורים לצורך האקספו, דיור בהישג יד לתושבי העיר לאחר מכן, לנצל תשתית רכבת קלה שנבנתה לצורך האקספו ולהיצמד לעיר הקיימת ולשמור על השטחים הפתוחים בסביבת העיר מפיתוח פרברי זוחל.

קיימא ניתנת עדיפות למיחזור קרקע מפותחת, אשר לא נעשה בה שימוש אופטימלי. קרקע כזו יכולה להמצא באזור תעשייה שננטש או שיש מקום לשנות את יעוד כדי להגדיל את מגוון הפעילויות באזור, ע"י ציפוף של אזור מגורים קיים, או ע"י בנייה מחדש אם לא ניתן לשדרג את הבניינים הקיימים. ניתן לפתח קרקע בתולה, אם היא כלואה בין אזורי בינוי קיימים, כך שאין לה ערך רב מבחינת רציפות של מערכות אקולוגיות, וישנם יתרונות לפיתוחה מבחינת שילוב האתר במערכות התחבורה המקומיות וחיבורו לתשתיות על קיימות.

היבטים תחבורתיים

נסיעות ברכב הפרטי מהוות היום חלק משמעותי (בין 30% ל-40%) מסך צריכת האנרגיה בארצות מפותחות. השלכותיהן מבחינת רעש, זיהום אויר, גזי חממה, ופיצול שטחים פתוחים על ידי דרכים מהוות פגיעה משמעותית במידת הקיימות הארצית או האזורית. בסקירה של מחקרים רבים שעסקו בקשר בין המבנה העירוני ובין מערכת התחבורה מראים אווינג וסרברו^[35] שהמשתנה

לעיתים נדירות יכול המתכנן להשפיע על מיקום הישוב המתוכנן. בדרך כלל ההחלטה מתקבלת על ידי הגורם המזמין את העבודה על פי זמינות הקרקע, ושיקולים כלכליים ופוליטיים. לפעמים ישנה גמישות מסוימת בקביעת מיקום הישוב או השכונה בתוך משבצת קרקע גדולה יותר, או שמתבקש המתכנן להציע הצעה לאיתור הישוב...

10. מיקום הישוב

למיקום הישוב או השכונה השלכות מרכזיות על עלויות הקמתו ותחזוקתו, על צריכת האנרגיה בבנייתו ובמהלך החיים בו, על איכות הסביבה והחיים שבתוכו, והשפעתו החיצונית על סביבתו. השיקולים המשפיעים על בחירת האתר הם: קירבה לאזור עירוני קיים ולמערכות תשתית ותחבורה, וטופוגרפיית האתר: שיפועי הקרקע והפנות, משטר הרוחות, וסוג הקרקע ותת-הקרקע.

* * *

למיקום הישוב השלכות רבות על רמת הקיימות שלו ומרחב האפשרויות של תושביו. ישוב איננו איבודדוהוא נדרש לקשרים עם ישובים אחרים בסביבתו. עליו להישען על תשתיות תחבורה המאפשרות את יציאתם של אנשים לעבודה, קיום עסקים בישוב, וקשרים למוסדות תרבות ומקומות מסחר. יש לחבר את הישוב למערכות תשתית של מים, חשמל וביוב. הישוב עצמו, ומערכות התשתית המשרתות אותו הן בעלות השלכות על מערכות אקולוגיות, כשלעצמן. על כן למרחק של ישוב ממקומות ישוב אחרים ומקווי התשתית הראשיים ישנן השלכות כלכליות, חברתיות וסביבתיות כבדות.

היבטי שימור קרקע

משאב הקרקע הוא המשאב הנדיר ביותר בישראל ויש לעשות בו שימוש מושכל. על כן, כדי לקדם פיתוח בר-

35. Ewing and Cervero, 2001



איור 10.2. מוקד עירוני סביב תחנת רכבת עירונית באוקלנד קליפורניה. המוקד פותח במה שהיה מגרש החניה של התחנה ניתן לראות גשר הרכבת בעומק התמונה.

דורש השקעה בצנרת, משאבות ואנרגיה. ההשקעות בניקוז יכולות להיות גבוהות מאוד ולהפריע למערך הניקוז הטבעי. כיום כמעט ולא ניתן להקים ישוב חדש ללא חיבורו למערכת טיהור ביוב. חיבור כזה דורש גם הוא השקעות בצנרת ובתחנות סניקה ואנרגיה בהפעלתו. לעיתים במערכת טיהור קיימת אין מספיק קיבולת ליישובים חדשים, ועל כן יש צורך בהשקעה נוספת בהגדלת ההספק של מערכות הטיהור. מכל הסיבות הללו עדיף למקם ישוב חדש בסמוך לקווי תשתית קיימים או בצמוד לישוב קיים, אשר ייתכן שאיננו מנצל בצורה מלאה את קיבולת מערכות התשתית הקיימות שלו, ואשר כבר גורם ממילא הפרעה למערכות הטבעיות.^[40,39]

היבטים טופוגרפיים

שיפועי קרקע וניקוז

היבט נוסף המשפיע הן על עלויות הבניה והתשתית והן על מידת הנגישות בישוב באמצעים לא ממונעים הוא שיפוע האתר. מצד אחד, שיפועים חזקים (מעל ל- 10%) מקשים על סלילת דרכים ובניית בניינים משני צדדי הרחוב (ובמיוחד מקשים על מתן נגישות

המשפיע ביותר על הליכה ברגל, נסיעה באופניים ונסיעה בתחבורה ציבורית, ועל הקטנת הנסיעה בכלי רכב פרטיים, הוא הנגישות האזורית של מקום הישוב או השכונה. הנגישות לפעילויות הנדרשות לצורך חיי היום יום כגון מקומות עבודה, חינוך, מוקדי מסחר ומוסדות תרבות משפיעה על מידת הצורך להשתמש ברכב הפרטי לצורך נסיעות אלה. עובדות אלה עמדו בפני מתכנני תכנית המתאר הארצית 35 לפיתוח ושימור כאשר המליצו על כך שלא יוקמו יישובים חדשים ברוב אזורי הארץ, ושעיקר הפיתוח יהיה בערים קיימות, או צמוד אליהן. לפיתוח הנשען על הרכב הפרטי ישנן גם השלכות קשות מבחינת השוויוניות בחברה, ומידת האוטונומיות של אלה שאין להם נגישות לרכב פרטי משום גילם ובריאותם או מחוסר אמצעים כלכליים.

אחד האמצעים להבטיח נגישות של יישובים או שכונות חדשות לרשת התחבורה הציבורית האזורית הוא לבנות אותם סביב תחנה של מערכת הסעת ההמונים – הקרוי פיתוח מוטה תחבורה ציבורית (Transit Oriented Development).^[37,36] שיטה זו ננקטה על ידי ערים כגון קופנהגן ושטוקהולם בפיתוח הפרברים שלהם ומשמשת כמדיניות הפיתוח של ערים חדשות בהולנד. הוא מהווה חלק אינטגרלי מצורת הפיתוח ביפן, שם מפתחות חברות הרכבות את הקו ותחנותיו, ושולטות בפיתוח שסביב התחנות.^[38] העיקרון של פיתוח מוטה תחבורה ציבורית הוא לבנות סביב התחנה מגורים בצפיפות גבוהה, תעסוקה ומסחר, מוסדות ציבור, וככר היכולה לשמש כמקום מפגש ופעילות ציבורית (כגון יריד שבועי) – כל זאת בתחום של חמש דקות הליכה מהתחנה. ככל שהמרחק מן התחנה עולה, נבנים המגורים בצפיפות נמוכה יותר. על ידי כך מירב המשתמשים נמצאים במרחק הליכה או נסיעה באופניים מתחנת הסעת ההמונים. כמו כן בקרבת התחנה נמצאים מוקדי מסחר ופעילות המאפשרים להם לבצע פעילויות נוספות בדרכם אל או מהעבודה.

היבטי מערכות תשתית ראשיות

לפיתוח בערים קיימות או בצמוד אליהן השלכות חשובות גם מבחינת ההוזלה והקטנת הפגיעה של מערכות תשתית ראשיות, וניצולן היעיל יותר. יש בו גם כדי לעזור בשיקום הכלכלי של אזורים קיימים, הזקוקים להשקעות ושידרוג. חיבור למערכות מים

36. Calthorpe, 1993

37. Newman and Kenworthy, 1999

38. Cervero, 1998

39. שטרן ועמיתים, 2004

40. משהב"ש, 2007



העונים לבעיות אלה.

מבחינת קרינת השמש עדיף ברוב אזורי הארץ לבנות על מדרונות דרומיים, דרום מערבים או דרום מזרחיים מתונים. בכל מקרה רצוי מאוד להישאר בתחום סטייה של 15 מעלות מזרחית או מערבית לדרום. בניה נמוכה ומדרגת על פני המדרון עשויה לאפשר נגישות סולרית לכל מבנה ומבנה ולמרבית השטחים הפתוחים בעונת החורף, וכן הצללה סלקטיבית בעונת הקיץ.

* * *

המלצה: במידת האפשר יש להימנע מהקמת ישובים חדשים. רצוי למקם שכונות חדשות באזורים אשר פותחו בעבר, אך אינם מנוצלים כראוי: על ידי שיקום אזורי תעשייה או חציבה, ציפוף שכונות קיימות, פיתוח אזורים שנשארו בין אזורי פיתוח קיימים, או בנייה צמודת דופן. רק במקרים חריגים יש להקים ישובים חדשים במרחב הפתוח, וגם אז יש לנצל לשם כך אזורים שנפגעו כבר על ידי פעילות אנושית ולנצל את הפיתוח כדי לשקמם.

יש לסמוך את הישוב או השכונה למערכת התחבורה הציבורית האזורית כדי לאפשר לתושביו להגיע למגוון גדול ככל האפשר של יעדים ללא שימוש ברכב פרטי. יש לתכנן את הישוב בצורה כזו שרוב תושביו יוכלו להגיע לתחנת התחבורה הציבורית ברגל או באופניים.

רצוי למקם את הישוב, או השכונה במדרון שאיננו תלול מ - 10%, עם פנות דרומית, דרומית מזרחית או דרומית מערבית במידת האפשר יש לייעד מפנים צפוניים לשטחים פתוחים, או לאזורים שאינם למגורים, וכן לנצל ואדיות ושטחים נמוכים לשטחים פתוחים שימשו גם כקולטי עודפי נגר בעת הצורך.

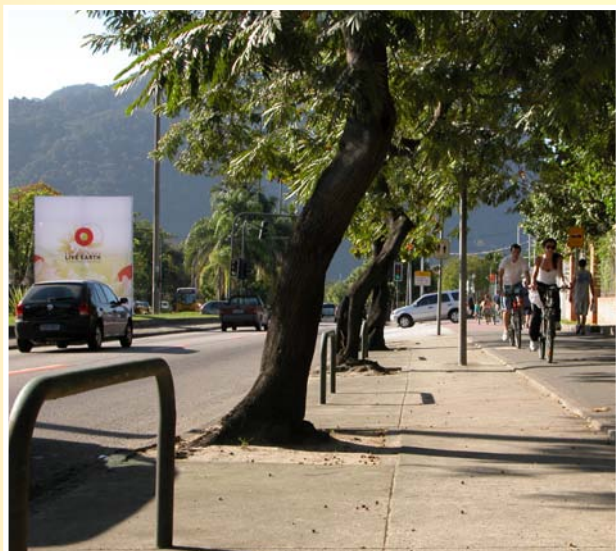
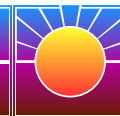
במכוניות למגרשים הנמצאים במורד הרחוב). מערכות הסעה מסילתיות, זקוקות לשיפועים הנמוכים מ - 3%. מנגד, בשיפועים נמוכים מאוד, קשה לנקז את האתר, ויש להשקיע השקעות גדולות במילוי קרקע וביצירת שיפועים למערכות הניקוז והביוב. בשנים האחרונות מתפתחת גם גישה הדוגלת בשימור מי הנגר לצורך החדרתם לתת-הקרקע, אם כדי למנוע איבוד וחלחול המים למי התהום, ואם כדי להגדיל את כמות המים הניגרים לשטחים ירוקים ברמת הבניין או השכונה, לשפר את התנאים לצמחיה ולהקטין את הצורך בהשקיה.^[41] הכרת תכונות הקרקע ומשטר המים באזור המיועד לתכנון מאפשרת תכנון נכון של שטחים פתוחים לנופש, חקלאות, ייעור וכו'.

קיים קשר בין האקלים לבין תצורות וסוגי הקרקע, ובין הקרקע לבין משטר המים. בנגב למשל, העדר צמחייה, גשמים אקראיים חזקים ורוחות גרמו לריבוי קרקעות צעירות יחסית ובעלות תכולה נמוכה מאוד של חומר אורגני. הגשמים הפתאומיים והשיטפונות הנוצרים בעקבותיהם גורמים לסחף של כיסוי הקרקע.

באופן כללי, חומר עדין סופג מים ובעקבות זאת גם תופח. קביעה זו נכונה לגבי רוב הקרקעות הלא סלעיות. יוצאות מן הכלל הן החוליות. התפיחה יוצרת בעיות שונות בתחום הבניה. אי-יציבות הקרקע מחייבת יסודות אשר יגיעו לשכבות פנימיות יציבות יותר (על פי רוב כלונסאות). תפיחה, והלחצים העלולים להיווצר על חלקי בניין בגינה, מחייבת פתרונות הנדסיים מיוחדים (רצפות תלויות מעל חללי אוויר למשל) והיא גם מסכנת מערכות תשתית. גיר ואבן חול, לעומת זאת, אמנם אינם תופחים, אך סופגים מים, ועובדה זו עלולה ליצור בעיות רטיבות בבניינים הבאים אתם במגע ישיר.

מידת החומציות של הקרקע עלולה להיות בעיה חמורה בבניה. מגע ישיר של חומר בניה סופג (כמו בטון) עם קרקע חומצית או בסיסית יגרום לו לספוג מים המכילים חומרים העלולים לתקוף ולפורר אותו ואת ברזל הזיון בתוכו. לסכנה הבטיחותית הזו קודמת בעיה אסתטית המתבטאת בהופעת כתמים המתפשטים על פני הקירות מקו המגע עם הקרקע כלפי מעלה. בכל מקרה יש צורך בבדיקות קרקע ובתכנון פרטי בניין מיוחדים

41. משרד הבינוי והשיכון, 2004



...בהתאם למיקום הישוב או השכונה, מבחינת הטופוגרפיה, ומבחינת הקשר למערכת התנועה העירונית או האזורית יש לתכנן את מערכת התנועה הפנימית שלו.

11. מערכת התנועה

מערכת התנועה של הישוב או השכונה היא הבסיס לחיים החברתיים והכלכליים בהם, לתחושת הביטחון והבטיחות ולהשפעה שלהם על סביבתם העירונית או הכפרית. תפקידה הם לספק מקסימום אפשרויות תנועה ומפגש לתושבים בתוך היישוב

ולחבר את הישוב אל העולם שמסביבו בצורה בטוחה ומפרה מבחינה חברתית וכלכלית. כיצד ניתן אפשרות מעבר וגישה לכלי רכב, החשובה לחיים הכלכליים של הישוב, ומנגד לספק נגישות טובה ובטיחות להולכי הרגל, להפחית את צריכת האנרגיה בתחבורה ולהקטין את השפעותיה השליליות: פליטת גזי חממה, זיהום אוויר, רעש, אובדן שטחים פתוחים ופגיעה בחיי הקהילה?

* * *

רקע היסטורי

ישובים פרה-מודרניים

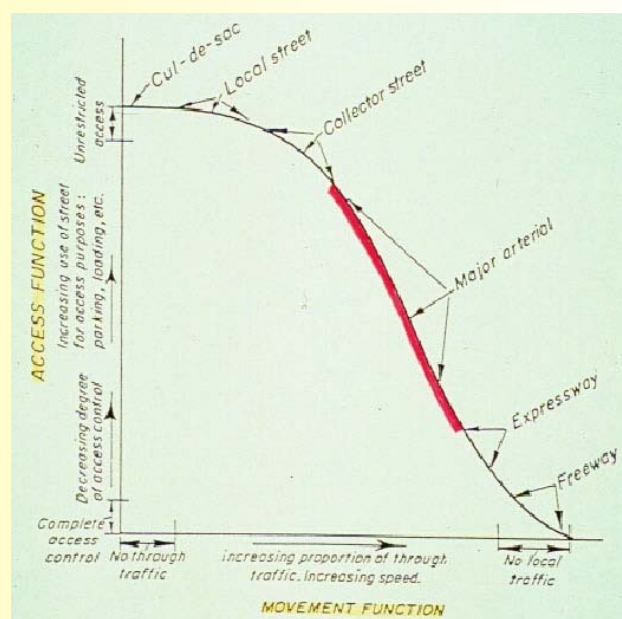
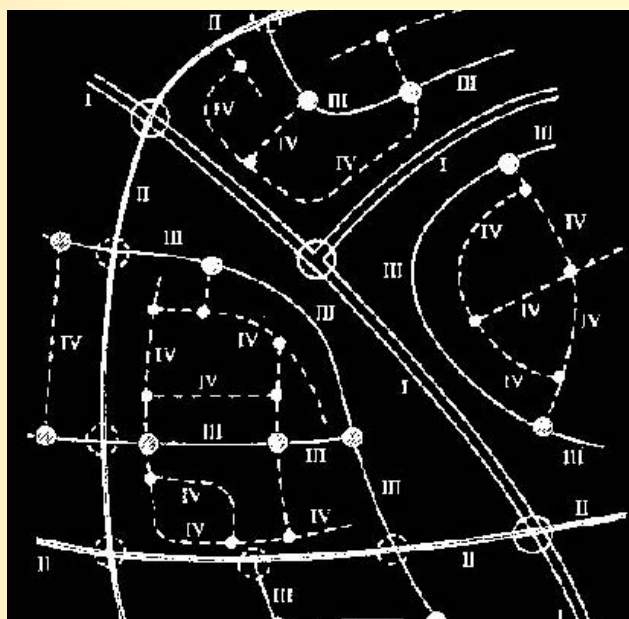
למערכת התנועה בישוב ישנם שני תפקידים בסיסיים. האחד הוא להעביר תנועה העוברת דרך הישוב ובתוכו ממקום למקום, והשני הוא לאפשר נגישות אל שימושי הקרקע הנמצאים לצד הרחובות. התוצאה של שני התפקידים הבסיסיים האלה יוצרת את תפקידה השלישי והמרכזי של מערכת התנועה, שהוא לאפשר ולעודד את החיים החברתיים והכלכליים של הישוב. חיים אלה נוצרים על ידי המפגש האקראי של תושבים ועוברי אורח תוך כדי תנועה ברחובות העיר. ערים היסטוריות רבות התפתחו דווקא משום שהיו מקומות מועדפים למעבר של נהר, או בין הרים, ועל כן הסיכוי למפגש עם אנשים אחרים ולסחר עמם היה גדול יותר.

לאורך רוב ההיסטוריה האנושית היה זה ברור שעל ישובים להיות מרוכזים ככל האפשר, ושרשת הרחובות שלהן צריכה להיות צפופה ומסועפת. זאת הן מסיבות של הצורך בהגנה מפני סביבה עוינת, והן כדי לאפשר לאנשים להגיע בקלות ובמהירות יחסית ליעדיהם.

התנועה הייתה ברובה רגלית (במהירות של 4-5 קמ"ש), וגם מי שנע בסוס או בכרכרה נע לכל היותר במהירות כפולה של כ – 10 קמ"ש, ועל כן לא סיכן את הולכי הרגל. בערים היסטוריות קיימת הירארכיה בין רחובות ראשיים ומשניים. זו מתבטאת בעיקר ברוחב הרחובות, ובכך שברחובות ראשיים ובמרכזי ערים המרחק בין צמתים קטן יותר, כדי להגדיל את הקישוריות שלהם אל סביבתם.

התכנון למכונית

המצאת המכונית שינתה את פני הדברים. לראשונה יכלו אנשים לנוע בדרכים במהירויות גבוהות – אשר מהוות סכנה להולכי הרגל מצד אחד, ומאידך נמצאות בקונפליקט עם תנועה איטית המשרתת נגישות לשימושי הקרקע שלצד הדרכים. כדי לפתור את הקונפליקטים הללו, פיתחו מתכנני ערים ותחבורה את ההירארכיה התפקודית של הרחובות בערים. שיטה זו מסווגת את הדרכים בעיר על פי תפקודם התנועתי הבסיסי, ואומרת שככל שרחוב חשוב יותר לשירות תנועה עוברת, כך יש לצמצם בו את הנגישות. מנגד, ככל שרחוב משרת יותר נגישות לשימושי הקרקע, יש



איור 11.1. ההירארכיה התפקודית של הדרכים וביטוייה במבנה הרשת.

לצמתיים של מערכת הדרכים הראשית, בצורת קניונים ומרכזי תעסוקה חוץ עירוניים. קניונים אלה נגישים בדרך כלל רק ברכב, מה שמגדיל את התלות ברכב הפרטי ופוגע בהזדמנויות החיים של אלה שאינם יכולים להרשות לעצמם להחזיק רכב, או שאינם יכולים לנהוג.

חזרה לרשת הדרכים המסורתית

החל משנות השישים של המאה ה-20 הושמעה ביקורת על גישה זו לתכנון מערכת התנועה. החלה בביקורת ג'יין גייקובס^[42], באבחנתה שהרחוב העירוני הוא הבסיס לחיים הכלכליים והחברתיים של העיר. אלכסנדר במאמרו המפורסם: "העיר איננה עץ"^[43] הראה שהעיר המודרנית מתוכננת בדרך כלל על ידי מערכות הירארכיות, אשר אינן מתאימות בעצם ליצירת חיים אנושיים. ערים מסורתיות, לעומת זאת, מאופיינות על ידי מבני רשת לא הירארכיים שבהם יש ריבוי קשרים בין מרכיבים שונים.

קישוריות רשת הדרכים ברמה המקומית

הגדלת אפשרות הבחירה

כדי שער תוכל לתפקד היטב, חשוב שיהיה נעים ללכת בה, ואחד התנאים לכך הוא שהמרחק בין צמתיים בעיר

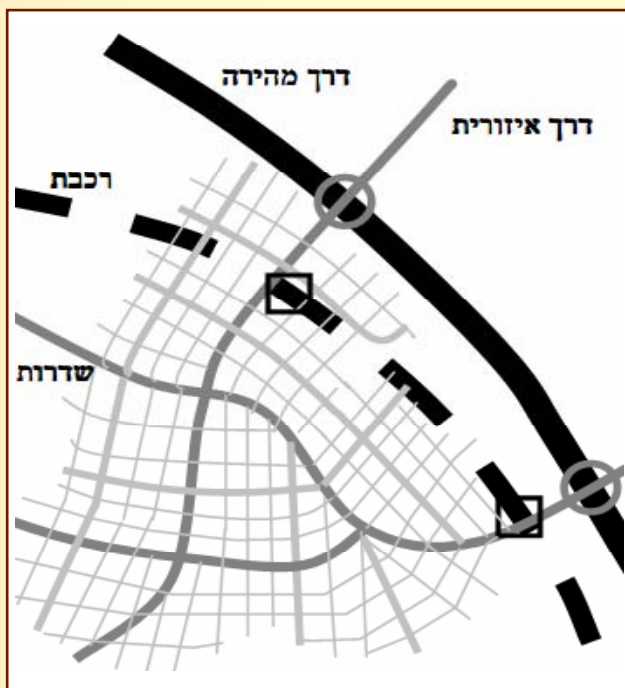
להקשות על תנועה עוברת דרכו.

התוצאה של תפיסה זו היא שככל שדרך נמצאת גבוה יותר בהירארכיה התנועתית, כך יש לה פחות צמתיים והנגישות המיידית אליה מצידי הדרך מבוקרת יותר (לדרך המהירה, הנמצאת בראש ההירארכיה, אין כלל נגישות מצידי הדרך. אין בה צמתיים שבהם ישנו קונפליקט בין תנועות הבאות מכיוונים שונים והשאפייה היא גם להקטין את מספר המחלפים ככל שניתן). גישה זו לתכנון הפכה למקובלת בעולם כולו, הונחלה לדורות של מהנדסים ומתכנני ערים כדרך "הנכונה" לתכנון מערכת התנועה בישובים, ומוסדה באמצעות הנחיות תכנון לרחובות בערים. כמו כן דגלו המתכננים בהפרדה בין תנועת הולכי הרגל וכלי הרכב, מתוך רצון לאפשר לכלי הרכב לנוע במהירות האפשרית, ולאפשר להולכי הרגל תנועה חופשית ובטוחה.

הבעיה היא שמבחינה יישובית חל היפוך שרוקן את מערכת התנועה מתפקידה החברתי והכלכלי, וניתק בעצם את מקור החיים של הישוב – התנועה העוברת ברחובות. כיון שהנגישות לרחובות הראשיים מוגבלת, הסיכויים למפגש בין תושבים ובעלי עסקים לאורך הדרך ובין עובדי אורח הם נמוכים. מנגד, ברחובות המתוכננים לנגישות טובה, הסיכוי למעבר של אנשים נוספים מעבר למרחב המקומי קטן מאוד, ועל כן אין הם מושכים פעילות כלכלית משמעותית. התוצאה הייתה משיכה של הפעילות העסקית אל מחוץ לישובים

42. Jacobs, 1961

43. Alexander, 1964



איור 11.2. דיאגרמה של מערכת התנועה הרצויה.

על כן...

על מערכת התנועה לספק בראש ובראשונה אפשרויות תנועה לתושבים ברגל, באופניים ובתחבורה ציבורית. הבסיס למערכת הוא רשת רחובות ושבילים צפופה ומסועפת, הקשורה היטב לסביבתה על ידי חיבור ישיר לדרכים אזוריות ולאמצעי הסעת המונים. יש להתייחס לכל ישוב או שכונה כאזור **מיתון תנועה**, ולתכנן את כל הרחובות, כולל הרחובות הראשיים כמרחבי הולכי רגל.

44. Llewelyn-Davies, 2000

45. Hillier, 1996

יהיה קטן ככל האפשר. ככל שמספר הצמתים ליחידת שטח גדול יותר, יש להולך הרגל יותר אפשרויות תנועה ממקום למקום בישוב, ועל כן ההליכה הופכת להיות מעניינת ונעימה יותר. מחקרים נוספים הראו שהמרחק האופטימלי בין צמתים ליצירת סביבה עירונית נעימה נע בין 80-100 מ'.^[44] במרכזי הערים רצוי להגיע למרחק קטן אף יותר בין צמתים, כדי להגדיל את שטח המגע שבין הרחובות ובין המסחר המצוי בקומות הקרקע.

יתרון נוסף של הקטנת המרחק בין הצמתים הוא הגדלת הסיכויים להתפתחותם של שימושים מסחריים לאורך חזית הרחוב. כולנו יודעים שהמיקום האידיאלי למסחר הוא בפינת רחובות, משום שמיקום זה נראה לאנשים הנעים בארבעה כיוונים שונים. ככל שהמרחק בין צמתים קטן יותר, כך יש סיכויים גבוהים יותר שתיווצר חזית מסחרית רציפה. קיום מסחר יוצר משיכה להולכי רגל נוספים, וכך נוצר היזון חוזר חיובי התורם להגדלת כמות הולכי הרגל ברחובות.

היתרון השלישי של יצירת רשתות עירוניות צפופות הוא תרומתם לביטחון אישי ברחובות העיר. הייתה זו שוב ג'יין ג'ייקובס שהראתה שהתנאי לביטחון אישי בעיר הוא נוכחותם של תושבים ועובדי אורח ברחוב, ונכונותם להתערב במקרה של אירועים שאינם בגדר התנהגות מקובלת ברחוב. היליאר ושותפיו^[45] הראו שיצירת רשתות הירארכיות, שאין בהם מעבר של אנשים מחוץ לתושבים מייצר אזורים ריקים מאדם במשך רוב שעות היום. אזורים אלה מעודדים פעילות פלילית.

קריאה נוספת

משרד התחבורה (2002) **הנחיות לאזורי מיתון תנועה**. ירושלים: משרד התחבורה.

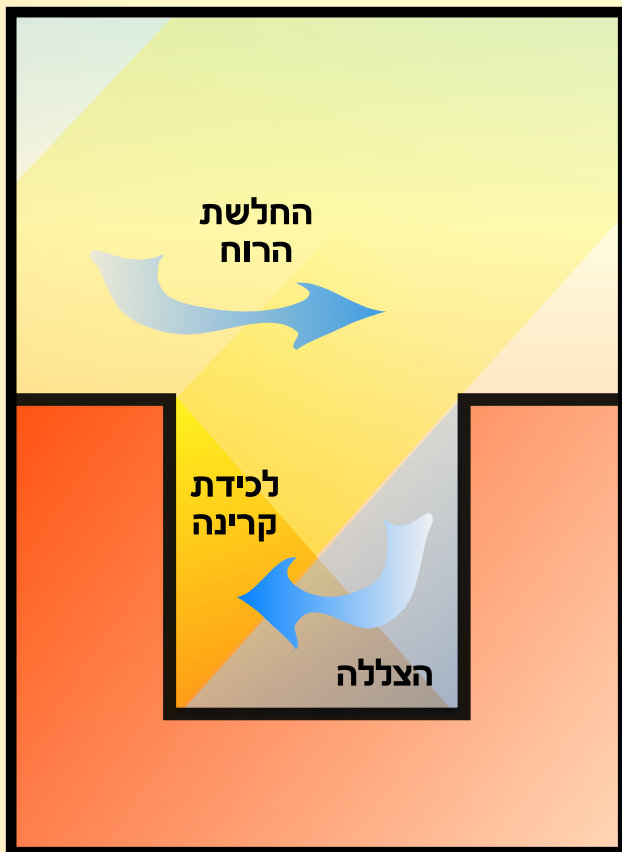
Marshall, S. (2005) *Streets and Patterns*, London and New York: Spon Press.

PedShed (2006) **Walkable Urban Design and Sustainable Placemaking**

Salingaros, N. (2005) *Principles of Urban Structure*, Amsterdam: Techne Press.

Southworth, M. and E. Ben-Joseph (2003) *Streets and the Shaping of Towns and Cities*, Island Press.

Space Syntax Laboratory (2003) **Housing and Crime: the space syntax online database of crime and space studies**



איור 12.1. רחוב בעל חתך "קומפאקטי" יוצר מספר תופעות בו זמנית: הצללה פנימית, לכידת קרינה והחלשת הרוח.

שני, ברחוב "צפוף" עלולים להיות החזרי קרינה רבים בין המשטחים, כאשר בכל פגיעה נוספת של קרן אור במשטח חלק מהקרינה נבלע וחלק הולך וקטן מוחזר - כך שבסה"כ חלק גדול יחסית של הקרינה המקורית "נלכד" בתוך החלל, וחלק קטן יחסית מוחזר לשמיים. תהליך זה מוביל להתחממות, הן בטמפרטורת האוויר והן בעוצמה הכללית של **קרינה ארוכת גלים** אשר האדם חשוק אליה. משום שהרחוב הצפוף מתאפיין ב**גזרת חשיפה לשמיים** (Sky View Factor) שהיא מצומצמת, פיזור החום הקרינתי בגלים ארוכים מתבצע בקצב איטי יחסית - תופעה שגם היא גורמת להתחממות של האוויר ברחוב, בעיקר בשעות הערב.

טמפרטורת האוויר משפיעה על העומס התרמי של האדם באמצעות החלפת אנרגיה בהסעה, אשר שיעורה נקבע גם על ידי מהירות הזרימה של אותו אוויר. כל עוד נמצא האוויר בטמפרטורה נמוכה מזו של פני הגוף (שבדרך כלל נעה בין 34-35 מ"צ), עליה במהירות הרוח מגבירה את סילוק החום מהגוף בהסעה, ולצורת הרחוב יש השפעה חשובה על מהירות זו בתוך החלל.

12. חתך הרחוב

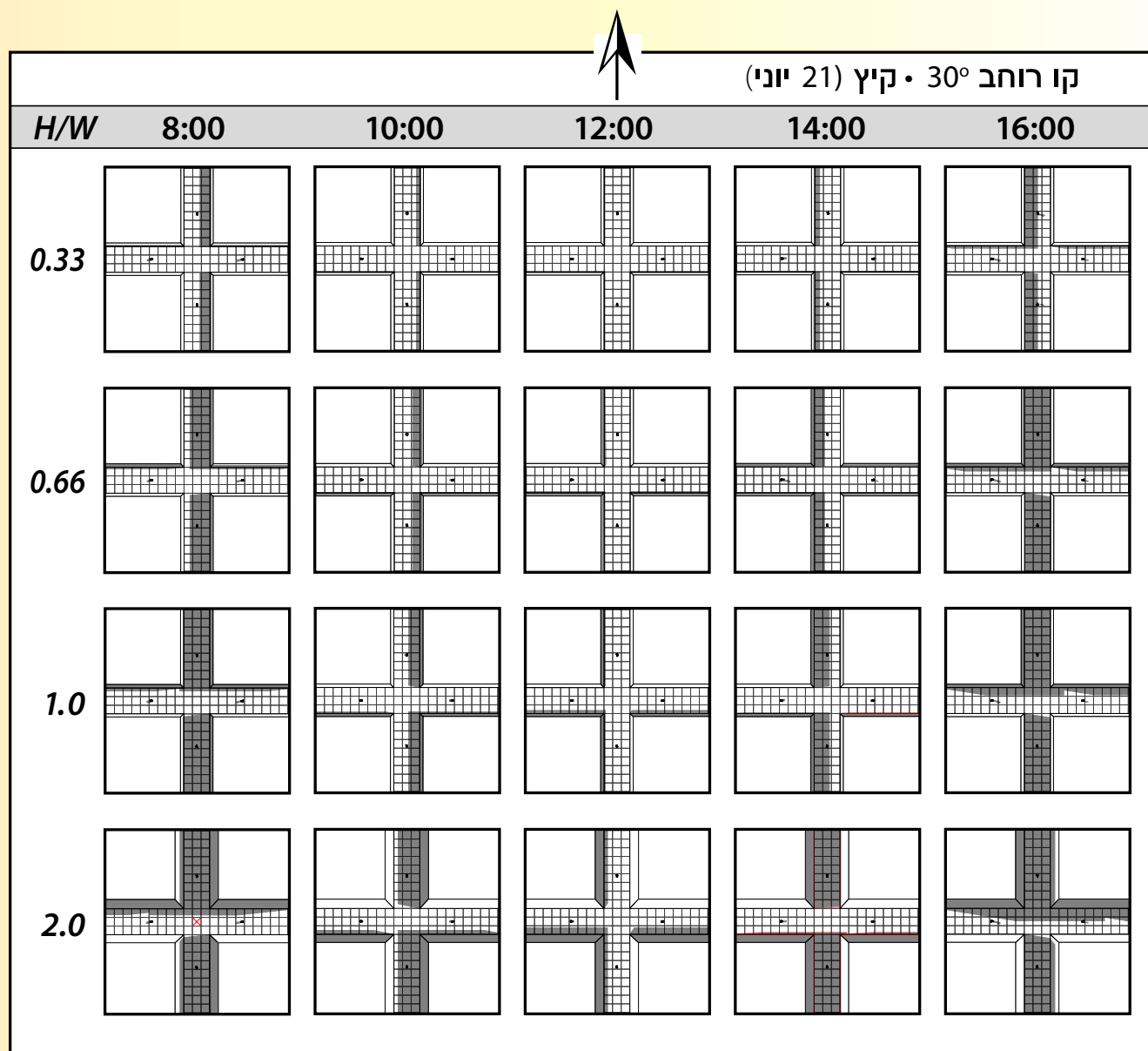
מרקם עירוני צפוף עם רחובות יחסית צרים ועמוקים עשוי ליצור שטחים מוצלים רבים בימי הקיץ. מצד שני, הגדלת הצפיפות גורמת ל"לכידה" של חום קרינתי ועלולה לפגוע באוורור החלל, ואף למנוע נגישות שמש רצויה בחורף. כיצד ניתן לתכנן מערכת רחובות שעונה על הדרישות המנוגדות האלה ומביאה לשיפור הנוחות של הולכי רגל ברחוב?

* * *

בפרק 7 על **מיקרו-אקלים בחלל עירוני**, הוצגה דרך חישובית להערכת העומס התרמי המוטל על אדם ברחוב בהתאם לתנאי האקלים ותכונות הבינוי. אם נבחין בהשפעות הבסיסיות של תכונות כגון צורת הרחוב - כלומר, יחסי גובה-רוחב בחתך שלו וכיוון צירו - מתברר ששינוי מסוים בצורת הרחוב עלול לגרום השפעות מרובות, ואף מנוגדות, בו זמנית (איור 12.1).

החישוב של עומס תרמי מבטא החלפות אנרגיה בין האדם לסביבתו, בעיקר באמצעות **קרינה והסעה**. בשעות היום, ברוב ימות השנה ובמרבית אזורי הארץ, הגורם האקלימי הבולט ביותר הינו **קרינת שמש ישירה**. לצורת הרחוב יש השפעה מכרעת על ההצללה בתוכו - לא רק על רמת החשיפה של האדם עצמו אלא גם על חשיפתם של משטחים (כגון קירות ופני הריצוף). באיורים 2-3 נראה שההצללה בתוך הרחוב עולה באופן כללי כאשר גדל היחס בין גובה לרוחב (H/W). אבל השינוי בהצללה אינו אחיד, אלא משתנה בהתאם לכיוון הרחוב, לעונת השנה ולשעה ביום. כפועל יוצא **ממסלול השמש**, ה"ציפוף" של הרחוב גורם לחסימה של הקרינה הישירה ברחוב שצירו מכוון צפון-דרום בעיקר בשעות הבוקר ואחה"צ בקיץ, ובצהריים בחורף הוא גורם לחסימה בעיקר ברחוב בעל ציר מזרח-מערב.

הציפוף של הרחוב גם מגביל את חשיפתו של האדם **לקרינה מפורזרת** בשמיים, ובמצב שמוטל צל עמוק בתוך הרחוב, האדם גם פחות חשוק **לקרינה מוחזרת**. מצד



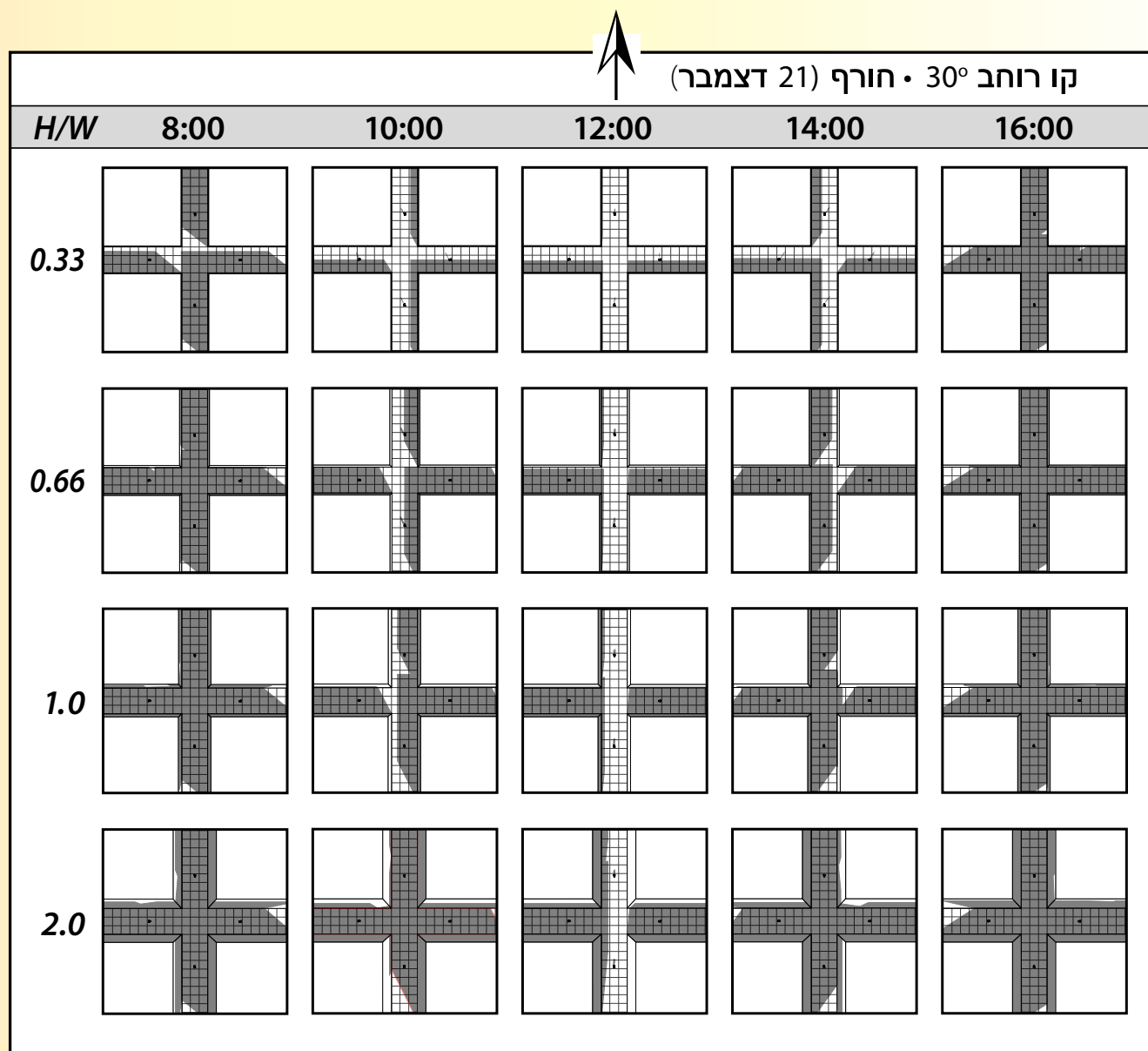
איור 12.2. הצללה ברחובות בעלי ציר צפון-דרום ומזרח-מערב, וחתכים (יחסי גובה רוחב) שונים, במהלך יום קיץ.

באמצעות אידיז זעה. קצב הקירור באידיז מושפע גם הוא ממהירות הרוח, אבל בעיקר מוגבל על ידי הלחות – דהיינו, ריכוז אדי המים באוויר. למרות שהלחות לא תלויה באופן ישיר בצורת הרחוב, נמצא שקצב האידיז-דיות מצמחיה וקרקע רטובה אכן מושפע מהיחס בין שטח "ירוק" לבין סה"כ פני השטח שגובל בחלל הרחוב, כולל קירות (שבדרך כלל "יבשים"). לכן, בנסיבות מסוימות הציפוף של הרחוב יכול להקטין את העלייה בלחות ולכן לשפר את יעילות הקירור של הזעה – אך בו זמנית, האוויר עלול להיות יותר חם.

כיצד, אם כך, משפיע ציפוף הרחוב העירוני על העומס התרמי הכללי של הולכי הרגל? ניתן להעריך

באופן כללי, ככל ש"מצטופף" חתך הרחוב (דהיינו, עולה ערכו של H/W), כך נחלשת זרימת הרוח בסמוך לגוף האדם (ראה איור 7.7, פרק 7). לכן, גם מבחינתו של אוורור הרחוב, הציפוף העירוני גורם להתחממות. עם זאת, חשוב לציין שהאטת הרוח תלויה גם בכיוון ציר הרחוב יחסית לכיוון הרוח: כאשר הזרימה מקביל לרחוב, המהירות בגובה ראש האדם עשויה להיות כ-40-50% מזו של הזרימה ה"חופשית" מעל הבניינים וכאשר הרוח נושבת בניצב לציר הרחוב המהירות של תנועת האוויר בתוך הרחוב עלולה לרדת ל-20-25% בלבד.

בנוסף לקרינה והסעה, גוף האדם מחליף חום



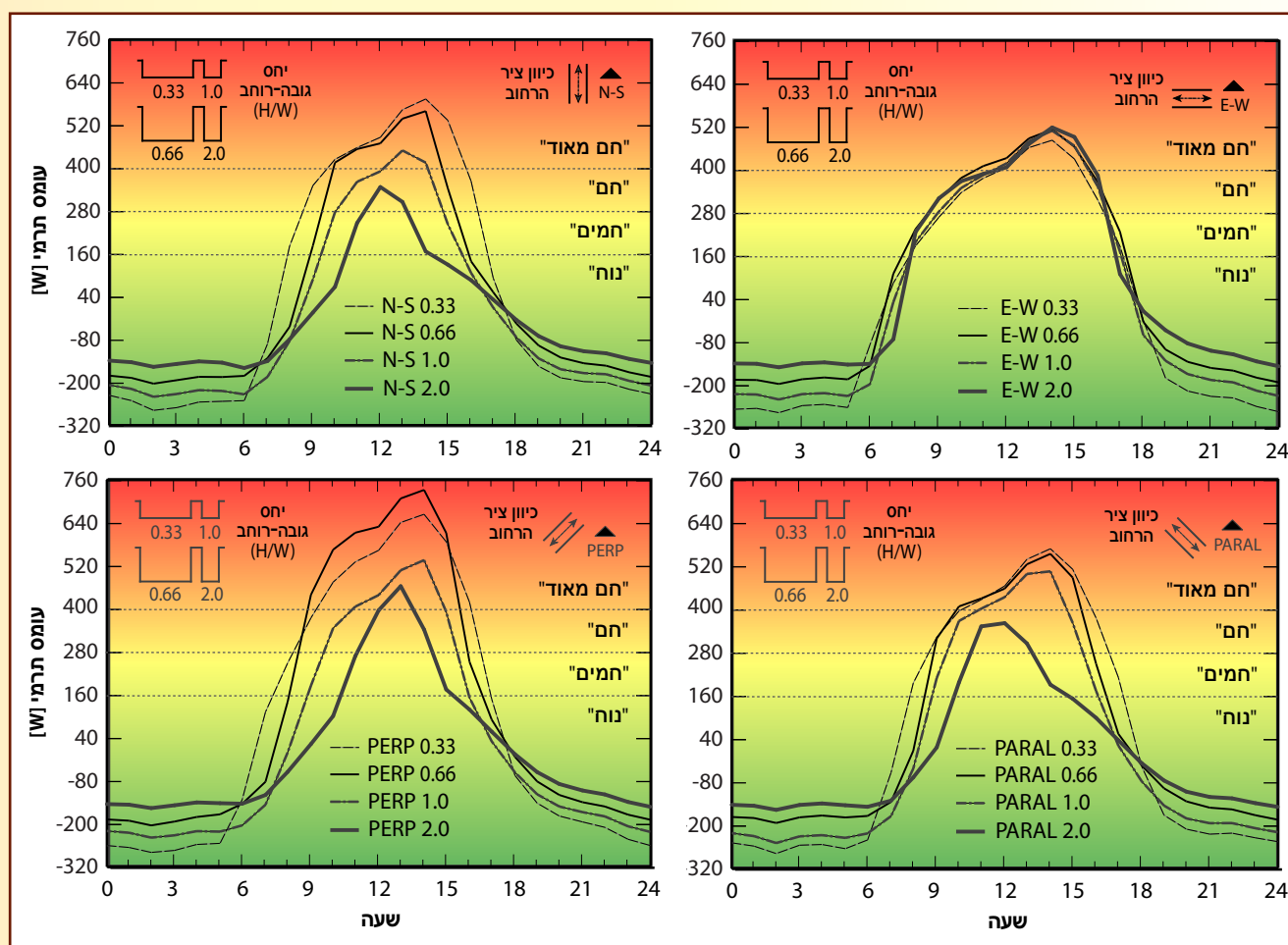
איור 3. הצללה ברחובות בעלי ציר צפון-דרום ומזרח-מערב, וחתכים (יחסי גובה רוחב) שונים, במהלך יום חורף.

טמפרטורה רחבות בין יום ולילה. החורף מתאפיין שמיים בהירים לרוב ובקרינה חזקה, וברוחות חזקות ולילות קרים.

באיור 12.4 מוצגים ערכי מדד ה-ITS במהלך יום קיץ, עבור ארבעה חתכי רוחב (0.33, 0.66, 1.0, 2.0) וארבעה כיווני צירים (צפון-דרום, מזרח-מערב, מקביל לרוח צפון-מערבית, וניצב לה). ניתן לראות שברחוב בעל ציר צפוני-דרומי, העומס התרמי של אדם בשעות החמות הולך וקטן ככל שעולה היחס בין גובה המבנים לרוחב החלל ביניהם (H/W) – כלומר,

את ההשפעה המשולבת של כל הגורמים הנזכרים עד כה באמצעות המדד לעומס תרמי (ITS), ולהבחין בקשר בין מדד זה לתנאים הנוצרים ברחובות בעלי צורות שונות. במחקר שבוצע באזור הנגב, מבחן מסוג זה נעשה באמצעות מתקן ניסוי שמדמה שטח עירוני – כאשר בתוכו ישנם "רחובות" מוקטנים בעלי צורות שונות. הדגם העירוני נבנה מחומרים אשר תכונותיהם התרמיות והאופטיות דומות לחומרי בניה אמיתיים, ונמצא דמיון תרמודינאמי גבוה בין המודל לשטח עירוני אמיתי.^[46] הבדיקות נעשו בקרית שדה בוקר שברמת הנגב, אזור שמתאפיין בימי הקיץ בתנאים חמים ויבשים, קרינת שמש חזקה, ותנודות

46. Pearlmutter et al., 2005



איור 4. השפעתו של חתך הרחוב על העומס התרמי של הולכי רגל, בכיווני ציר שונים, ביום קיץ באזור הנגב.^[47]

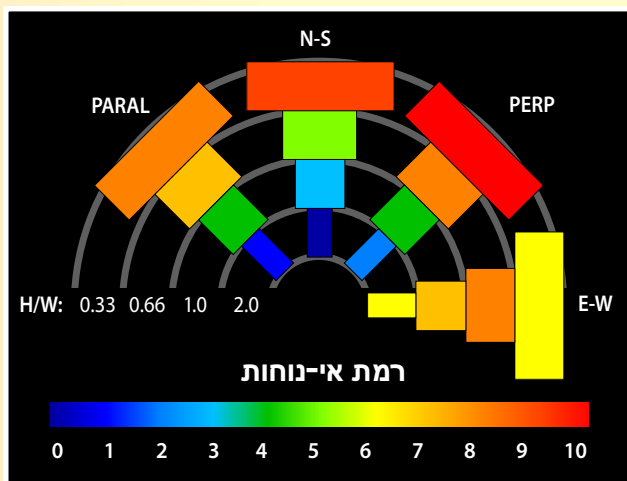
גבוה) מתבטאים בעיקר בהצללת גוף האדם באופן ישיר, אבל ישנם ביטויים נוספים: הצללת משטחים והורדת הטמפרטורה הקרינתית של הסביבה, וצמצום החשיפה לקרינה מפוזרת ומוחזרת לאורך רוב שעות היום. כתוצאה מהבדלים אלה, ישנה הקלה בעומס התרמי ברחוב הקומפאקטי גם בסמוך ל-12:00 בצהריים, כאשר כיוונו של קרני השמש קרוב לאנכי, וההצללה ברחוב הינה זניחה. חשוב לציין שמיתון העומס התרמי בשעות היום ברחוב קומפאקטי מתממש למרות שבחללים הצפופים יש עליה קלה בטמפרטורת האוויר יחסית לחלל הפתוח יותר, וגם הקטנה יחסית במהירות הרוח.

בנוסף לכך ניתן לראות כי בשעות הלילה, היחס בין ערכי ה-ITS של חתכי הרחוב השונים מתהפך: לאחר

רמת אי-הנוחות מתמתנת יחד עם "ציפוף" הרחוב. הבחנה זאת מודגשת פחות ברחובות "אלכסוניים" (אלה שצירים מסובבים ב-45 מעלות ביחס לצפון-דרום), וכמעט נעלמת ברחוב בעל ציר מזרח-מערב.

השוואה זו מדגישה שבתנאים חמים ויבשים אלה, הגורם האקלימי המכריע בקביעת העומס התרמי של הולכי רגל ברחוב הנו הצללה – כלומר, הקטנת החשיפה לקרינת השמש הישירה בשעות היום. ברחוב שמכוון לאורך ציר צפוני-דרומי, יוטל צל מקירות המבנים הסמוכים ברוב שעות היום: בבוקר ע"י קירות המזרחיים, ואחר הצהריים ע"י המערביים. משום שרחוב מזרחי-מערבי פחות מוצל, היתרונות של צפיפות גבוהה בהקטנת החשיפה לקרינה מתקזזים עם החסרונות – דהיינו, "לכידת" הקרינה והחלשת הזרימה של האוויר בתוך החלל. כמפורט למעלה, יתרונות אלה של רחוב "קומפאקטי" (בעל יחס H/W

47. Pearlmutter et al., 2007a



איור 12.5. סיכום של אי-הנוחות היומית בקיץ בהתאם לחתך וכיוון הרחוב, בהתחשב במספר השעות ועוצמת העומס התרמי.

יאפשרו התחממות יתר בשעות היום. הגורם השני קשור לתכונות האקלים האזורי והעירוני: ככל שקיימות תנודות טמפרטורה רחבות בין יום ולילה (כדוגמת אזורים מדבריים), כך "יתרון הצפיפות" מודגש יותר. באקלים לח, כגון זה של מישור החוף, ההקלה בעומס החום כתוצאה מעליה בצפיפות הבינוי קיימת אבל פחות מודגשת, משום שהפרשי הטמפרטורה מצומצמים יחסית, והנוחות תלויה במידה רבה יותר באוויר יעיל.

שיקול אקלימי נוסף בתכנונה של צורת הרחוב הינה ההשפעה בעונת החורף. תוצאות הבדיקה מלמדות שהגורם העיקרי בהחמרת אי-הנוחות בתנאים קרים (שקשור ישירות לצורת הרחוב) הינו גורם הרוח (wind chill factor). משום שבאופן כללי הרחוב הקומפאקטי מעניק הגנה בפני רוחות קרות, "יתרון הצפיפות" שריר גם בעונה זו. יחד עם זאת, השיקול של **נגישות שמש** בחזיתות דרומיות של בניינים מכתוב צפיפות נמוכה יותר ברחובות לאורך ציר מזרחי-מערבי.

48. ערכים אלה מבוססים על בדיקות בתנאים מבוקרים שנערכו ודווחו ע"י ברוך גבעוני (Pearlmutter et al., 2007a). לאחרונה, בוצעו סקרים של תחושות תרמיות של מדגם אוכלוסייה בתנאי חוץ, והתוצאות מאמתות את ערך המעבר מתחושה דל "נוח" לתחושה של "חמים" – אך מסתמן שהמעברים ל"חם" ו-"חם מאוד" מתרחשים בערכי ITS גבוהים יותר מהצפוי.

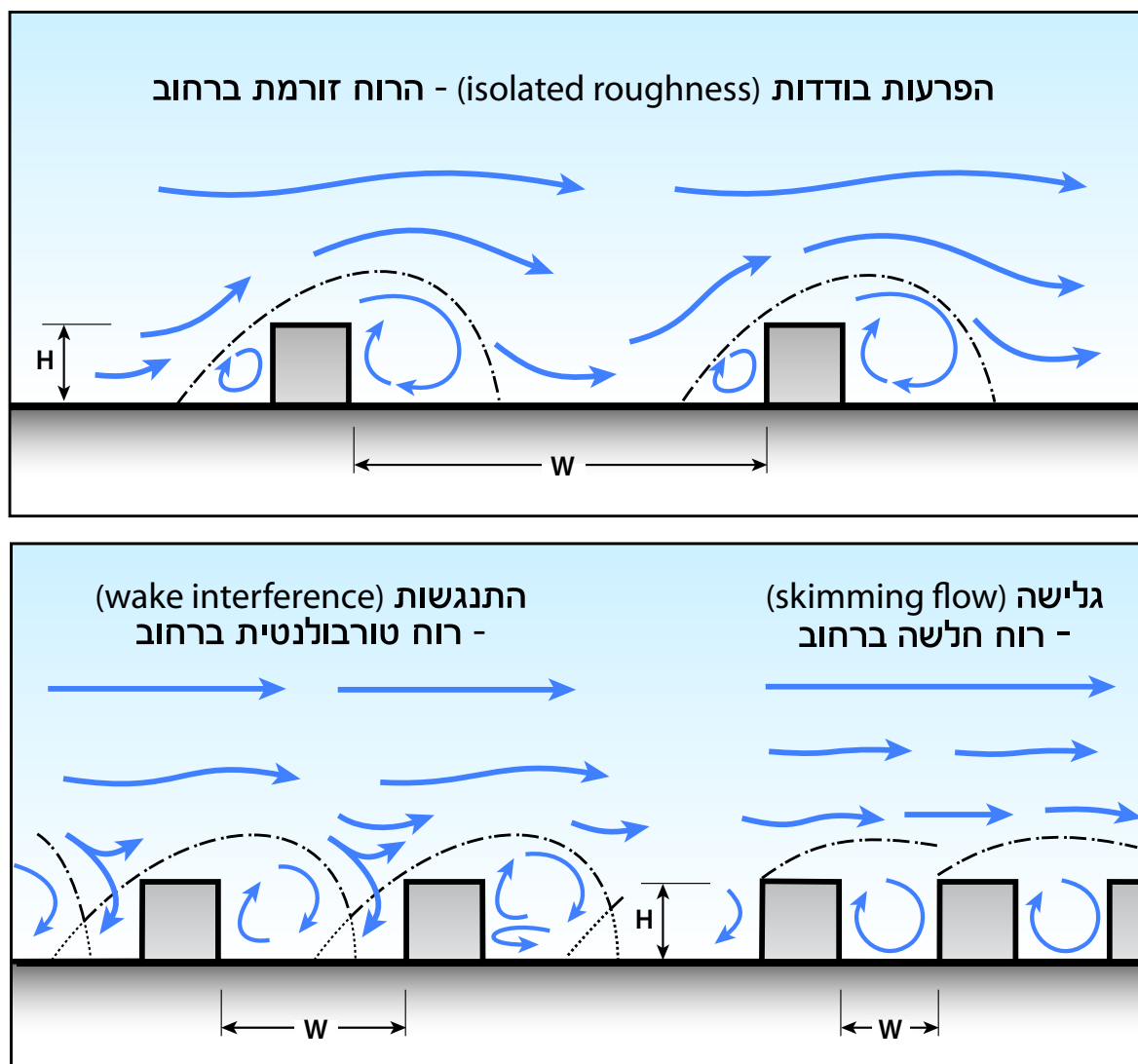
49. Pearlmutter et al., 2007b

החשיכה, הערכים הגבוהים ביותר מופיעים עבור הרחובות הקומפאקטיים ביותר במקום ההפך. הסיבות לכך הינן בעיקר הקצב המוגבל של פליטת חום לשמיים כתוצאה מהצמצום בגזרת החשיפה, ואיבוד החום המואט בהסעה, כתוצאה מהחלשת הרוח. המשמעות מבחינת הנוחות התרמית של היחס ההפוך בלילה – כאשר האדם ברחוב צפוף מאבד אנרגיה בשיעור יחסית איטי – תלויה בתחושה התרמית (thermal sensation) שמוצגת על ידי ערכי המדד לעומס תרמי (thermal stress) באותו טווח.

באיור 12.4, מסומנים ערכי "סף" של עומס תרמי השייכים לשינויים בתחושת הנוחות.^[48] ניתן לראות שלמרות הריבוי של שעות ביום שבהן האדם מרגיש אי-נוחות ברוב המקרים, בשעות הלילה שוררת תחושה "נוחה" בכל המקרים, ללא קשר לצורת הרחוב. לכן, ה"היפוך" בערכי ה-ITS בערב אינו משמעותי מאוד מבחינת תחושת הנוחות שנוצרת, ויחסים שנצפו בשעות היום אלה המכריעים בעונת הקיץ.

באיור 12.5, מוצג סיכום של היקף "אי-הנוחות" שנגרם ביום קיץ בתנאים הנתונים, בהתאם לצורת הרחוב (H/W וכיוון הציר)^[49]. בתרשים יש ביטוי לסה"כ מספר השעות היומיות של אי-נוחות, וגם לעוצמת אי-הנוחות. בהמחשה זו ניתן להבחין בהבדלים משניים בין צורות, כגון ה"יתרון" הקל מבחינת נוחות ברחוב שמכוון עם צירו במקביל לרוח הצפון-מערבית, לעומת רחוב שמכוון בניצב לזרימה (את ההשפעה של צורת הרחוב על זרימה ניצבת ניתן לראות באיור 12.6). באופן כללי, ניתן לראות בתרשימים אלה ביטוי לעקרון חשוב בתכנון אקלימי של רחובות עירוניים: ה"ציפוף" של חתך הרחוב מהווה יתרון מבחינת עומס חום כל עוד ציר הרחוב מכוון לצפון-דרום או קרוב אליו, אבל לא בהכרח כאשר הוא מכוון בניצב.

עיקרון זה מותנה בשני גורמים, כאשר אחד מהם קשור לתכונות החומרים העירוניים. כאשר הבניה ברחוב מורכבת מחומרים "כבדים" בעלי קיבול חום גבוה (כגון בטון, אבן, לבנים וכו'), הקרינה שפגעה במבנים ביום (במקום בגוף האדם) נאגרת כחום לאורך שעות רבות. בכך, אנרגיה זאת תורמת להתחממות החלל – והאדם בתוכו – בעיקר בלילה, כאשר טמפרטורת האוויר נמוכה מזו שביום, ולכן הנוחות התרמית אינה נפגעת באופן משמעותי. לעומת זאת, חומרים קלים

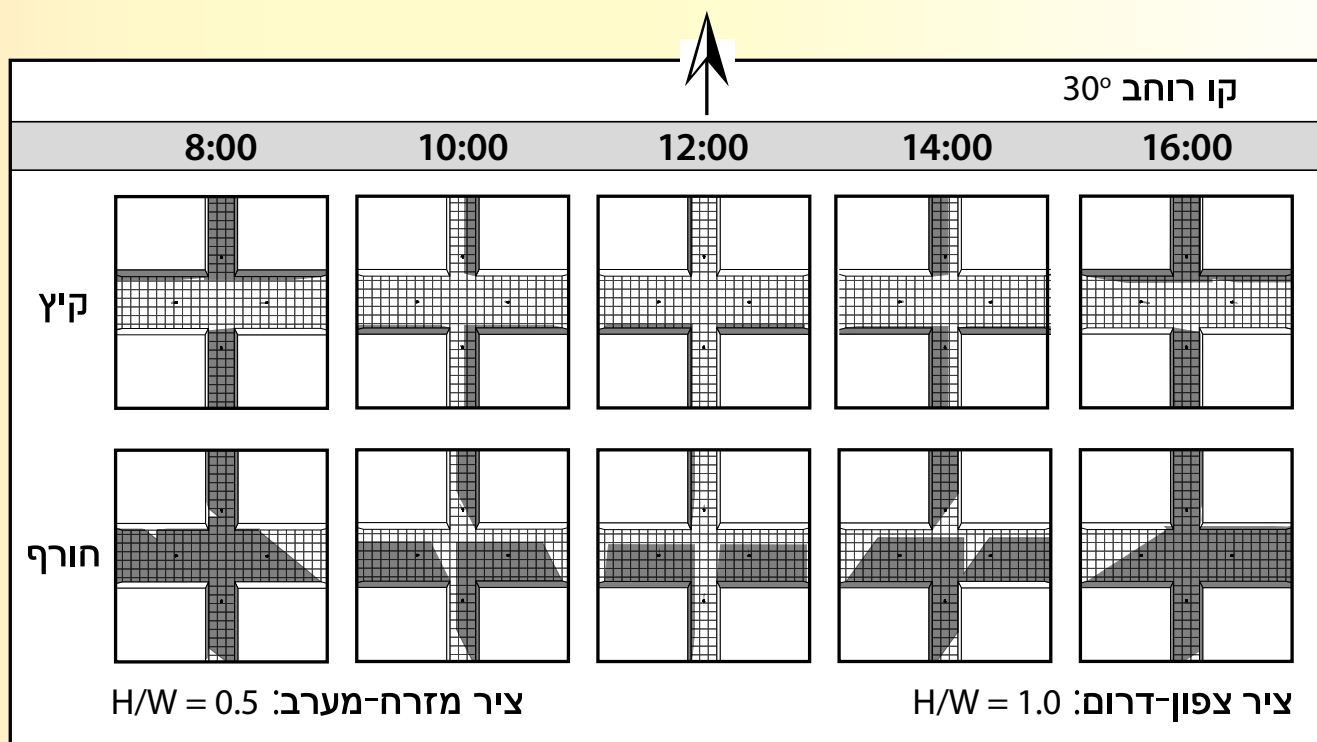


איור 12.6. השפעה של חתך הרחוב על זרימת רוח בכיוון ניצב לציר: הצמצום ברוחב גורם לזרימה יותר טורבולנטית בצפיפות בינונית ($H/W > 0.3-0.4$) ובצפיפות גבוהה ($H/W > 0.7$) הזרימה העירקית גולשת מעל הרחוב (Oke, 1987).

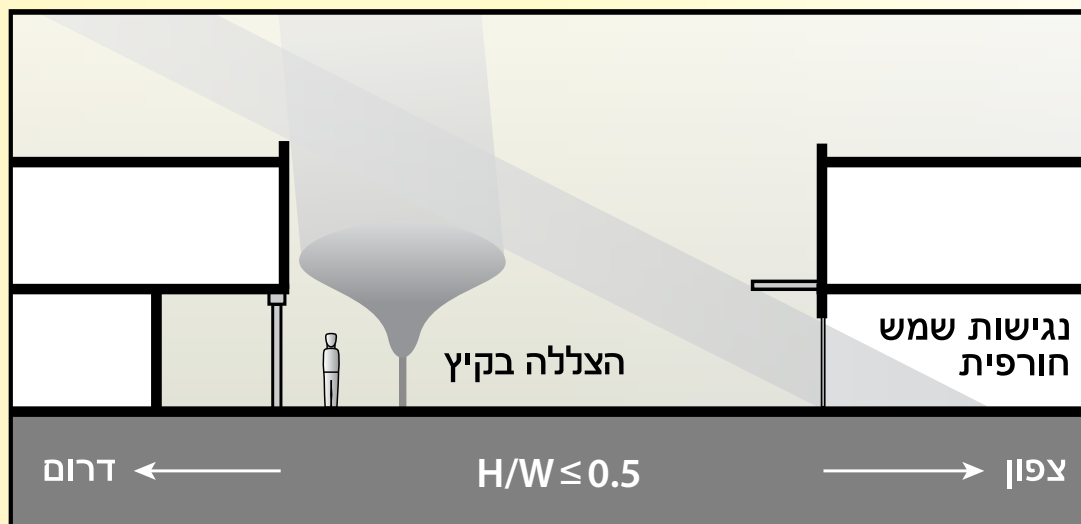
המלצה:

על סמך השיקולים האקלימיים הנזכרים לעיל, בעונות השנה השונות, מומלץ ליצור "מרקם עירוני סלקטיבי" אשר משלב את העקרונות הבאים (ראה איור 7):

1. רצוי לעודד יצירת חתך רחוב "קומפאקטי" בעל יחס גובה בין גובה לרוחב ($H/W > 1$) כאשר ציר הרחוב מכיוון צפון-דרום או קרוב לכך (עד 45 מעלות לכל כיוון). המלצה זו נכונה במיוחד באקלים חם-יבש בעל תנודות טמפרטורה גדולות, ובמקרה של בניה עירונית שמתאפיינת ב"מסה תרמית" חיצונית גבוהה.
2. רצוי שרחובות בעלי ציר מזרחי-מערבי יהיו פחות צפופים ($H/W < 0.5$), כל עוד שחזיתות הבניינים בצד הצפוני של הרחוב עשויים ליהנות מקרינה ישירה לשם חימום פאסיבי. רצוי ברחובות כאלה לנקוט אמצעי תכנון מפורטים ליצירת אזורים מוצלים בקיץ. באיור 8 מוצג מספר דוגמאות של אלמנטים תכנוניים המתאימים למטרה זו – וביניהם עצי צל בצד הדרומי של הרחוב, קולונדות-קומות עמודים, פרגולות וסככות.



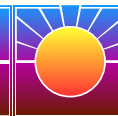
איור 7. הצללה במהלך יום קיץ במרקם עירוני "סלקטיבי" – אשר משולבים בו רחובות בעלי צייר צפון-דרום "קומפקטיים" (שמאפשרים הליכה בצל עמוק ברוב שעות היום), ורחובות בעלי צייר מזרח-מערב רחבים יחסית (שמונעים פגיעה בנגישות שמש חורפית לחזיתות דרומיות של בניינים).



איור 8. חתך רחוב בעל צייר מזרח-מערב, בהדגשת פתרונות מפרטים ליצירת צל מקומי בקיץ (כגון עצי רחוב, קומות עמודים ומתקני הצללה קלים) תוך שמירת נגישות שמש לחזיתות דרומיות של בניינים בחורף.

* * *

ניתן לראות דוגמא ליישום של "מרקם עירוני סלקטיבי" במקרה של **שכונת נווה צין**. השימוש בעצי רחוב צריך להיעשות תוך התחשבות בתכונות העץ (רמת ותזמון נשירת העלים, צריכת מים, ועמידות). רצוי כי אמצעי **הצללה** בנויים סמוכים לחזיתות הבניין ירוכזו בכניסות ובפתחים אחרים כדי להקל על המעבר בין חוץ ופנים.



13. שטחים פרטים פתוחים



1. חצרות צמודות

שטחי חוץ צמודים ליחידות מגורים ולבניינים ציבוריים הם חלק חשוב ואינטגרלי של הבניין מבחינת השימוש היומיומי ומבחינת אפשרות בקרת המיקרו-אקלים. רצוי לספק שטחים פתוחים למספר יחידות דיור גדול ככל האפשר, תוך שמירה על פרטיות ותוך התחשבות בתנאי האקלים המיוחדים לאזור.

רוב אזורי הארץ מתאימים מאוד לניצול חצרות צמודות לבניינים, שכן בדרך כלל רבים ימי חורף שזורחת בהם השמש, ובימי הקיץ שעות הבוקר המוקדמות, אחר הצהריים המאוחרות והערב מתאימות מאוד לשהייה ולפעילות בחוץ.

חצרות צמודות מסווגות לשני סוגים עיקריים, אם כי הקו המפריד ביניהם אינו תמיד קל להבחנה ובמקרים רבים הם משולבים:

• חצרות המוגדרות על ידי גדרות וקירות

• חצרות המוגדרות על ידי מסת הבניין.

יש מבנים שבהם החצר מוגדרת בחלק מהיקפה על ידי מסת הבניין ובחלק מהיקפה על ידי גדרות וקירות מסיביים.

חצרות צמודות יעילות במיוחד במקרים של בניית שטיח נמוכה וצפופה, אם כי הן תורמות גם כאשר סוג הבינוי הוא אחר. במקרה הראשון מאפשרות החצרות להצמיד בניינים זה אל זה בקירות משותפים, כך שהיחס בין השטח הכללי של המעטפת החיצונית במבנן לבין שטח הרצפה הכולל קטן. קיר משותף בין שתי יחידות במבנן מתפקד למעשה כקיר פנימי אשר אינו פעיל מבחינה אנרגטית (אינו קולט ואינו מאבד אנרגיה מהסביבה ואליה), משום שהטמפרטורה משני צידיו דומה. בבניית שטיח מאפשרת החצר הצמודה אוורור ותאורה טבעיים ליחידות החסומות מכל עבריהן על ידי יחידות אחרות.

במבני שטיח ומבנים אחרים מאפשרת החצר הצמודה בקרה גם בתחומים אחרים:

איור 13.1. חצר דרומית מוצלת על ידי עצים נשירים ואלמנט אופקי נייד. אלמנט מאותו סוג מצל על מרפסת דרומית-מזרחית. (שכונת נווה צין, מדרשת בן-גוריון, אדריכל: יצחק מאיר)

• חגנה מפני רוחות חזקות (קרות או חמות) הגורמות לעליית שיעור חדירת האוויר למבנה (אינפילטרציה) ולהפסד או רווח אנרגיה בהסעה;

• חגנה חלקית מפני גרגרי חול הנישאים ברוח ומהווים מטרד רציני באזורים יובשניים למעשה ניתן להגדיר את כל הארץ כיובשנית (drylands);

• הגדרת שטח צמוד לבניין לגינון אינטנסיבי (אפילו עתיר מים) שיהווה 'ריאה ירוקה' לבניין;

• טיפול נכון בעיצוב החצר והפתחים המופנים אליו (ממדים, פרופורציות, אמצעי הצללה וכו') ובחירת חומרי גמר נכונים (בעלי מקדמי בליעה והחזרה נמוכים) עשויים להקטין את הבהוק ועודפי הקרינה החודרים דרך פתחים המופנים לחוץ (חצר).

הפניית החצר הצמודה תגדיר במידה רבה את תכונותיה, יעילותה ושימושיה.

• הפניה דרומית מאפשרת חשיפה לשמש בעיקר בחורף. שימוש באמצעי הצללה סלקטיביים (צמחיה נשירה, הצללה בידי צילונים וכו') מאפשר את ניצול החצר כמעט במשך כל עונות השנה. מכיוון שהחצר



איור 13.2. סוג ומיקום הצמחיה ביחס לחזית ולפתחים בה עלולים לפגוע בנגישות שמש בחורף. משמאל שני בניינים שפתחיהם הדרומיים מוצלים בחורף; מימין, בניין בעל נגישות שמש מיטבית ב-21 בדצמבר. (שכונת נווה צין, מדרשת בן-גוריון, צילום: י. מאיר)

עשויה להיות בעלת יתרונות לשימוש בשעות אחה"צ בקיץ (עת השמש במערב), ולהיפך לגבי חצר מערבית. אין לבטל מקרים כאלה העשויים להיות מוכתבים על ידי היחס בין הבניין לנוף וכדומה, אך יש להתייחס בזהירות לתכנון החצר על פרטיה, ולתכנון חלק המבנה המונה אליה על פרטיו, במיוחד פרטי פתחיו.

גודל החצר הצמודה נקבע לפי השימוש המתוכנן ואין להגזים בו.

• אם יש כוונה לגן אותה אינטנסיבית, הרי שחצר גדולה מדי מהווה מעמסה מבחינת הטיפול והאחזקה ומבחינת השימוש במים להשקיה.

• גודל יתר מקטין את יעילותה של החצר כמחסום מפני חול או רוחות. מבחינות אלה הגדלת החצר תצריך את הגבהת הקירות או המבנים התוחמים אותה.

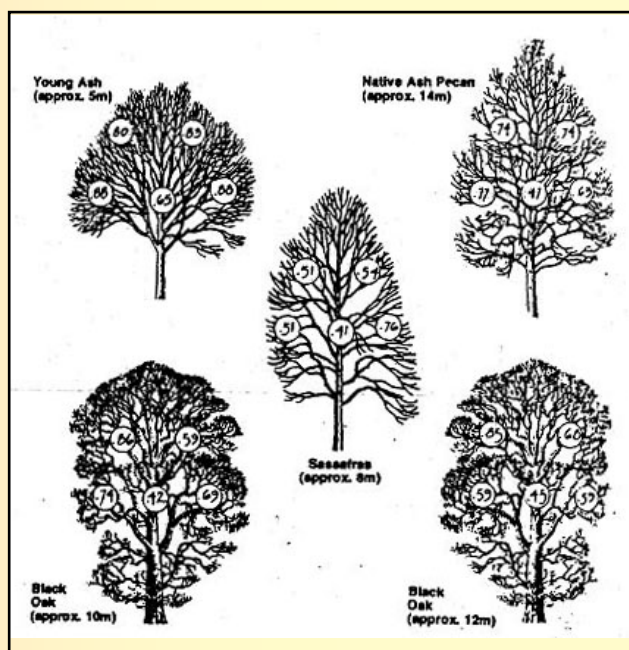
עם זאת אין לתכנן חצר קטנה מדי:

• אם דרושה נגישות שמש דרומית למבנה, יש לבדוק שהזיגוג הדרומי המיועד לקליטת השמש אכן חשוף לה ואין הוא מוסתר בידי תוחמי החצר הקרובים או הגבוהים

תחומה בצדה הצפוני בקיר הבניין, ומכיוון שברוב המקרים הקשר בין החצר לחדר המגורים (או חדרים אחרים) הוא דרך דלת מזוגגת רחבה, ניתן לנצל את חלל החצר הצמודה כאמצעי ריווח בין מבנים המאפשר נגישות קרינת שמש אל החלון לצורך חימום סולארי של הבניין.

• הפניה צפונית מאפשרת קיום חצר צמודה מוגנת לפחות בחלקה משמש ישירה, כך שהיא נוחה לשימוש בשעות מסוימות בעונת הקיץ. ברוב אזורי הארץ חצר מסוג זה תאפשר אוורור של המבנה על ידי ניצול הרוח הצפונית או הצפון-מערבית השכיחה (הבריזה הים תיכונית). לא רצוי פתח מזוגג גדול אל חצר זאת, משום שמאזן האנרגיה של פתח צפוני הוא שלילי בחורף.

• הפניה מזרחית או מערבית אינה מומלצת, משום שאינה נותנת אף לא אחד מהיתרונות של החצר הצפונית או הדרומית, ויש להגן על הפתחים המזוגגים שבינה לבין הבניין מפני שמש הקיץ החזקה בשעות הבוקר או אחר הצהריים. יחד עם זאת, חצר מזרחית



איור 13.3. צמחים נשירים עלולים להטיל צל משמעותי גם בעת הנשריה^[52]. ראה גם טבלה 13.1.

מושגת בחצר פרטיות מרבית על ידי הפרדתה מחללים פתוחים ציבוריים ומחצרות של בניינים סמוכים.

הצללה נכונה של החצר במשך הקיץ (צמחייה, פרגולות וכו') היא חיונית. ההצללה בשילוב מרכיבים נוספים (בריכות, מזרקות) יכולים להבטיח מאגר אוויר קריר לצינון ואוורור המבנה בחודשי הקיץ. מומלץ לפתוח את הבניין אל החצר בגבהים שונים כדי לאפשר אוורור יעיל (פתחים גבוהים ליציאת אוויר חם, פתחים נמוכים לכניסת אוויר קריר). צמחייה נשירה והסרת אלמנטי הצללה מבטיחים חשיפה לקרינת שמש חורפית, ועל ידי כך אגירת חום בקירות וברצפת החצר. לשם כך ניתן לנצל גם גופי מים (בריכות, מאגרים שונים) בנוסף למרכיבי הבניין. מספר מחקרים אודות השפעת מים על המיקרו-אקלים של שטחים פתוחים נעשו במסגרת EXPO92 בסביליה, ספרד, וניתן לקרוא עליהם בעיקר ספר מאמרי כנס PLEA91^[54,53]. קירוי החצר בחומר שקוף (זכוכית, פוליקרבוניט וכו') הופך אותה לחממה העשויה לצמצם את הצורך בחימום וניתן גם לחמם

50. Golany, 1980, pp. 21-22, 75-84

51. Oliver, 2007

52. Holzberlein, 1979

53. Alvarez et al., 1991

54. Givoni, 1998

מדי, או הצמחייה שבחצר.

גודל סביר לחצר צמודה לדירת משפחה יהיה 40-50 מ"ר, כאשר רוחב החצר המומלץ 4-5 מ'. במקרה זה גובה הקירות התוחמים אותו יהיה 2-2.2 מ'.

בתרבויות צפון אפריקה ואסיה, וכן סביב אגן הים התיכון, נוצרו השטחים הפתוחים הצמודים למגורים בגלל סיבות אקלימיות ותרבותיות. הפרשי הטמפרטורות בין החוץ לפנים בשעות השונות של היממה יצרו דפוס התנהגות מיוחדים לאזורים אלה (שהות בפנים המבנה המוצל בשעות היום לעומת שינה בשטח הפתוח הקריר בשעות הלילה). בתרבויות שונות שטחים פתוחים בתוך מתחם המגורים היו פיצוי מסוים עבור הגבלות תנועת הנשים בחוץ. עדות לחשיבות שטחי החוץ בתרבויות אלה מספקת העובדה שבמקומות שבהם לא ניתן ליצור שטחים אלה בגלל אילוצים שונים מילא את מקומם גג הבניין.^[51,50]

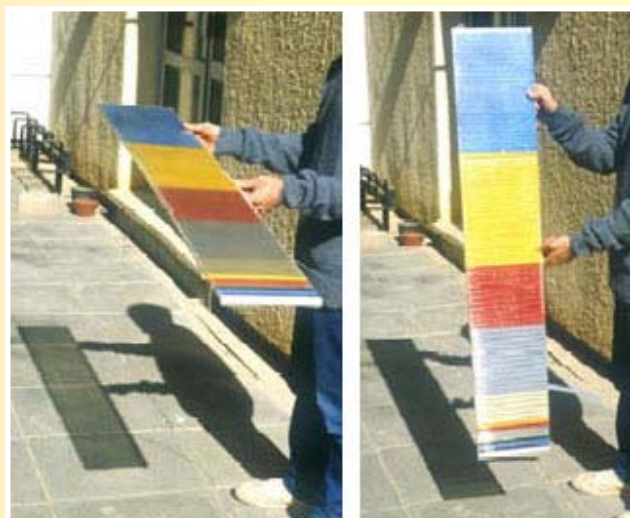
המלצה:

רצוי לספק חצרות צמודות ליחידות מגורים רבות ככל האפשר. ההפניה הרצויה לחצר היא דרומית. חצר צפונית עשויה להיות שימושית בעיקר בקיץ. חצרות מזרחיות ומערביות דורשות תכנון מיוחד שיאפשר את השימוש בהן. גודל סביר לחצר צמודה לדירת משפחה יהיה 40-50 מ"ר, כאשר רוחב החצר המומלץ 4-5 מ'. במקרה זה גובה הקירות התוחמים אותה יהיה 2-2.2 מ'. יחידות שאינן בקומת קרקע רצוי שתהיינה בעלות מרפסות מרווחות המאפשרות פעילות דומה לזו של החצר.

2. חצרות פנימיות

חצרות פנימיות, כלומר שטח בלתי מקורה בלב הבניין, הן אמצעי יעיל לבקרת אקלים הבניין באזורים בעלי אקלים קשה (חם או קר), בתנאים מסוימים. טיפוס בנייה זה מאפשר יצירת צפיפות מרבית בבנייה נמוכה, תוך הקפדה על תנאי תאורה ואוורור בכל יחידה. חצר פנימית מאפשרת סגירה מוחלטת בחורף והפיכתה לחממה, ופתיחה בקיץ לאוורור וצינון הבניין. שטח פתוח מסוג זה מספק פרטיות מרבית.

ארגון חללי הבניין סביב חצר פנימית מאפשר חלוקת הפונקציות השונות לאגפים נפרדים תוך שמירה על קשר ישיר של כולן עם החוץ ושמירת הפרטיות בכולן. כמו כן



איור 13.4. אמצעי הצללה סלקטיווי המאפשר חדירת קרינה בזוויות מסוימות וחוסת את הקרינה בזוויות אחרות. (תכנון: היחידה לאדריכלות ובינוי ערים במדבר. יושם בגן ילדים בנתיבות, בתכנון היחידה)

האוור על ידי אידוי. ניצול השטחים הפתוחים בכל עת אפשרי כאשר הם מוגנים מפני רוחות, סופות, קרינת יתר, גשם וכו'. ניצול נכון של תנאי האקלים בשטחים הפתוחים עשוי לשפר גם את התנאים בפנים המבנה. המיקום המומלץ לשטחים הפתוחים הוא צד דרום, אם כי לחצר צפונית יתרונות בקיץ (שטח מוצל, מאגר אוור קר יחסית לזה שבחצר דרומית). במקרה של שטח פתוח בתוך המבנה (חצר פנימית) כשדרושה חשיפה לשמש דרומית נמוכה בחודשי החורף, ממדי החצר ייקבעו כפונקציה של ממדי הבניין.

אזהרה: יש לזכור כי מיקרו-אקלים החצר הנו נושא מורכב ביותר, וכי חצר פנימית עלולה להפוך בקלות לנטל אקלימי!

לשטחים הפתוחים הצמודים לבניינים עשויה להיות השפעה חיובית על בקרת המיקרו-אקלים, אם הם מוצלים ומאווררים בעונה החמה וחשופים לקרינת שמש בעונה הקרה. צמחייה בשטחים אלה עשויה להקטין במידה רבה את כמות הקרינה, הבהוק וטמפרטורת האוור על ידי הצללת קירות הבניין והריצוף. ניתן להשתמש בעצים, שיחים וצמחים מטפסים, זאת בכפוף למגבלות שהוזכרו מעלה. חשיפת החלל ומרכיבי המבנה לקרינת השמש בחודשים הקרים תובטח על ידי שימוש בצמחייה

באמצעות אוור מהחצר את פנים הבית. יש להבטיח אפשרות פתיחה נוחה לאוורור החלל כדי למנוע תופעות של התחממות יתר בימים חמים.

יתרונם האקלימי העיקרי של טיפוס הבנייה המתבסס על חצרות פנימיות הוא צמצום ניכר של שטח המעטפת הבא במגע עם החוץ – בתנאי שמדובר בבנייה צפופה שבה חלקה העיקרי של המעטפת משמש קיר משותף עם מבנים סמוכים. במרקם מבנים צפוף יהיה שטח המעטפת החשוף לחוץ קטן מאשר במבנים עם חצרות צמודות (בבנין בעל תכנית בצורת 'ח' יהיה שטח המעטפת החשוף גדול ב-25%-45% מאשר במבן עם חצרות פנימיות). ובבנין בעל תכנית בצורת 'ר' יהיה שטח המעטפת החשוף גדול ב-70%.

טיפוס זה של בנייה בעלת חצר פנימית מופיע באזורים שונים ובתקופות היסטוריות שונות: ביוון הקלאסית וההלניסטית, ברומא ובמזרח התיכון. בניינים עם חצר פנימית שימשו למגורים ולפונקציות אחרות (חאנים, מנזרים ועוד). שימוש נרחב בחצר פנימית נעשה גם בבתי התת-קרקעיים באזורים מדבריים (אסיה, צפון-אפריקה) או במקומות שבהם מחסור בקרקע חקלאית הכתיב פתרון זה לניצול מרבי של האדמה. החצר הפנימית מהווה במקרים אלה מקור אוורור ותאורה יחיד. יש לזכור כי האילוצים שהכתיבו את השימוש בבנין עם חצר פנימית לא היו רק אילוצים אקלימיים. טיפוס זה הועדף בין היתר בשל היכולת ליצור באמצעותו מרקם עירוני צפוף המאפשר ניצול אינטנסיבי של הקרקע לצרכים תרבותיים (דרישה לפרטיות), לבעיות ביטחון ועוד. [56,55]

המלצה:

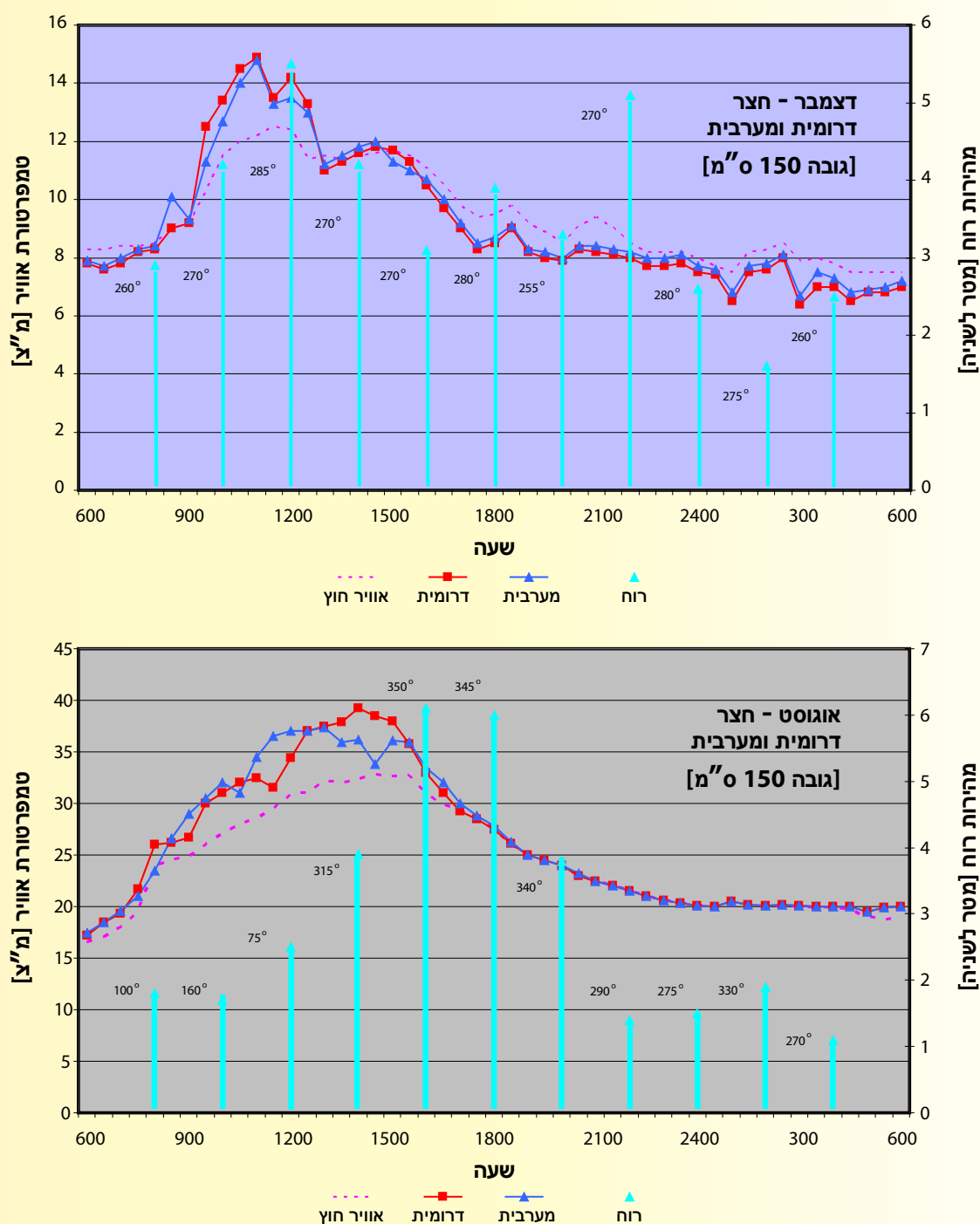
מומלץ להשתמש בחצרות פנימיות במרקם יישובי צפוף. על חצרות אלה לאפשר תאורה טבעית ואוורור לחללי המבנה השונים. תכנון החצר הפנימית חייב לאפשר את הצללתה ואוורורה כדי שלא תהפוך בקיץ למלכודת חום.

3. יצירת מיקרו-אקלים בחצר

צמחייה נשירה בשטחים הפתוחים מספקת הצללה בחודשי הקיץ וחושפת את השטח לקרינת שמש בחורף. הצמחייה ממתנת את הטמפרטורה על ידי בליעת קרינה והטלת צל. מים (בריכות, מזרקות וכו') עשויים לצנן את

55. Meir and Gilead, 2002

56. Peeters and Meir, 2003



איור 13.5. השוואה בין טמפרטורת אוויר בחוץ ובתוך חצרות פנימיות (בגובה 150 ס"מ מהקרקע). החצר אחת מפנה דופן פתוחה לדרום, והשנייה למערב. ניתן לראות כי בשתיהן טמפרטורת האוויר גבוהה מן החוץ בשעות היום בקיץ (מטה), ונמוכה מן החוץ בשעות הלילה בחורף (מעלה). העמודות התכולות מציגות את אזימות הרוח^[57]

להיעשות גם על ידי אידיוי מים ממקורות שונים: ניתן לנצל בריכות, מזרקות, ואפילו להרטיב משטחים שונים (קירות, רצפה, מחצלות וכו'). הן האוויר והן המשטחים

נשירה, או בצמחייה ירוקת-עד במיקום ובגובה מתאים (עצים גבוהים), או על ידי שילוב של שני הסוגים. לאותן המטרות ניתן להשתמש בפרגולות, ובאמצעי הצללה ניידים או סלקטיביים.

הורדת הטמפרטורה בשטחים הפתוחים יכולה

57. Meir et al., 1995



שם עברי	נשיר	מבנה צמרת	חוף	הר	בקעה	נגב	הערות
דודוניה דביקה	ירוק עד	סגלגל	+		+	+	עמיד מאוד ליובש.
דק פרי מכונף	נשיר מותנה	סגלגל	+	+			פריחה צהובה חומה.
הרדוף הנחלים 'טיפוסי'	ירוק עד	מעוגל	+		+	+	פרח מלא וריק בצבעים ורוד, לבן וגווני ביניים.
כילופסיס סרגלי	נשיר מותנה	סגלגל	(+)		+	+	נוף אוורירי ודליל, לא באזורים בהם יש קרה.
לפטוספרמון חלק	ירוק עד	מעוגל	+		(+)	(+)	עץ דליל, גזע מיוחד, גדל בקרקע חולית.
מיופורום מחודד	ירוק עד	מעוגל	+				
פיטוספורום גלוני	ירוק עד	מעוגל	(+)	+			פריחה ריחנית.
קטלב משונן	ירוק עד	מעוגל	+	+			פריחה ופרי דקורטיביים, איטי, מחייב עיצוב.
קליסטמון 'הרקנס'	ירוק עד	זקוף	+	+		+	פריחה אדומה, מחייב עיצוב.
קליסטמון 'קינגס פארק'	ירוק עד	סגלגל	+	+	+	+	פריחה אדומה גדולה, מחייב עיצוב.
שיח אברהם מצוי	נשיר מותנה	מעוגל	+		(+)	(+)	פריחה לילכית או סגול בהיר.
תבטיה הרדופית	ירוק עד	מעוגל	+		(+)		פריחה אדומה גדולה, מחייב עיצוב.

טבלה 13.1. תכונות של שיחים מעוצבים כעצים קטנים עד גובה 7 מ' והתאמתם לאזורי הארץ השונים: החוף והשפלה, אזור ההר, בקעת הירדן והערבה, והנגב.^[60]

בהרבה, ועל תנאי מיקרו אקלים בחצר נחותים מאלה בשטח הפתוח. תוצאות אלה מצביעות על המורכבות של תכנון חצרות מוצלחות, תכנון החייב להתייחס באופן מושכל לפנות החצר ביחס לשמש ולרוח בעונות השונות, למידותיה וליחסי מידות אלה (פרופורציות), לחומרי הגמר וגוניהם, לצמחיה על משטר ההשקיה שלה, ואלמנטים נוספים. באופן פשטני ניתן לומר כי חצר שמשטחיה עשויים מחומרים כבדים (בטון ומוצרים, אבן וכדומה) תקלוט ותאגור יותר חום ביום קיץ, ותתקרר יותר בלילות חורף בהשוואה לחצרות המשלבות חומרים שונים וצמחיה. כך גם גודל חצרות חשופות: ככל שחצר גדולה יותר כך תיחשף יותר לשמש ותחמם מהר יותר ביום, אך גם תתקרר מהר יותר בלילה.

המלצה:

על תכנון החצר להתייחס לצרכים השונים בעונות השונות. כדי שהחצר תפעל ביעילות כמערכת המשפרת את תנאי המיקרו-אקלים, היא חייבת לענות על הדרישות האלה: הפניה נכונה בהתאם לזמן השימוש, הצללה דינאמית, פוטנציאל לאוורור והגנה מפני רוחות לא רצויות.

הרטובים מאבדים חלק מהחום על ידי אידיוי המים.^[59,58] באדריכלות המקומית של אזורים חמים היה נפוץ השימוש במים וקיבל ביטויים אדריכליים וטכניים שונים (בריכות, מזרקות ותעלות מים בחצרות, מכילי מים שונים ובריכות בשילוב עם ארובות רוח). יחד עם זאת, חיוני לזכור כי מבחינה פסיקלית תנאי בסיסי לקיומן ויעילותן של מערכות אלה הוא אקלים חם ויבש. עלייה בלחות באוויר מנטרלת את מערכות הקירור באידיוי ואף מחריפה את עומס החום בשל השילוב של טמפרטורה ולחות גבוהות. יתר על כן, בחלק גדול מן הדוגמאות המובאות תדיר בספרות המקצועית תפקיד המים היה בעיקר סמלי ואף בעל השפעה פסיכולוגית, אך בודאי לא זו של קירור, זאת בשל כמויות המים המצומצמות ששולבו במערכת. דבר זה הגיוני אם לוקחים בחשבון את זמינות המים המצומצמת אז (כמו גם כיום!)

מיקום נכון של השטח הפתוח ביחס לבניין (כיווני רוחות, זוויות שמש) עשוי לספק הגנה מפני רוחות חורפיות וסופות חול תוך ניצול של רוחות קלות בעונת הקיץ. עוד מוזכר תדיר בספרות האדריכלית כי בלילות קיץ גג הבניין מקרר את האוויר הבא במגע איתו, ואוויר קריר זה גולש מגג הבניין אל תוך החצר ובכך יכול לקרר אותה ואת החללים המתאוררים דרכה. במספר מחקרים שנערכו על ידי סגל היחידה לאדריכלות ובינוי ערים במדבר התקבלו תוצאות המצביעות על תהליכים מורכבים

58. Watson and Labs, 1983

59. Givoni, 1998

60. גלון ועמיתים, 1999



14. תכנית מתאר מודעת סביבה



איור 14.1. הכניסה לשכונת "נווה הצין" מכיוון דרום. תכנית המתאר ותקנון השכונה הוכנו מתוך שיקולים אקלימיים באזור מדברי.

תפקוד שטחי חוץ – יצירת סביבה נוחה להולכי רגל בתנאי המדבר הקשים הנה אתגר מהותי ומוחשי. הנוחות התרמית מושפעת מחשיפה לקרינה וגם לזרימת אוויר, בהתאם לתכונות החלל (ראה המלצות לתכנון של **חתך הרחוב** על בסיס שיקולים של **מיקרו-אקלים עירוני**). מטרה מרכזית בתכנון הכללי הייתה לאפשר תנועה רגלית בשכונה בתנאים נוחים ככל האפשר, במשך כל השנה, וזה על ידי תכנון שבילים, רחובות ושטחי חוץ אחרים בהם מובטחת הגנה מרבית מעומסים תרמיים מכבידים. בנוסף להטרדות תרמיות (חום וקור), מניעת החשיפה לאבק הוותה יעד חשוב.

אסטרטגיות תכנון

כדי להשיג את שתי המטרות הנ"ל, שולבו מספר היבטים חדשניים בתכנית המתאר ובתקנון הבניה.

1) דרכי גישה – מערכת התנועה בשכונה מחולקת לשני סוגים עיקריים של דרכים: רחובות משולבים, ושבילים להולכי רגל. אופיים של שני סוגי הדרכים נקבע תוך התחשבות בתנאי המיקרו-אקלים ונוחות בשטחי חוץ, כמו גם בחשיפה הרצויה של חזיתות הבתים הבודדים (ראה איור 14.2).

שכונת נווה-צין, מדרשת בן-גוריון

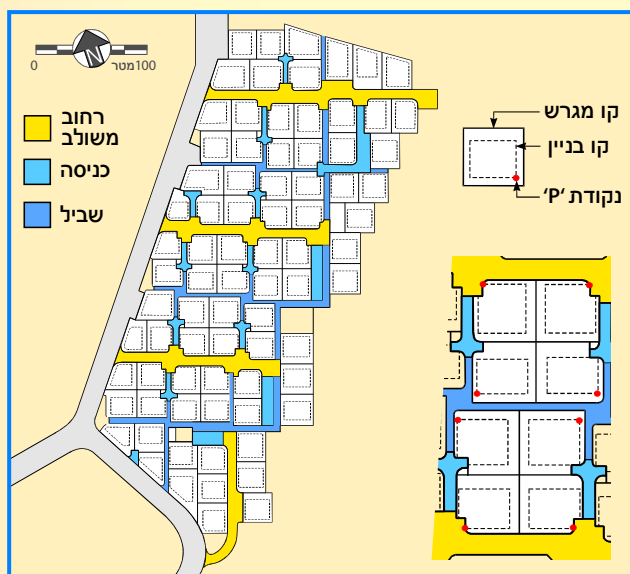
תכנון כללי: היחידה לאדריכלות מדברית

נווה צין הוקמה כשכונת מגורים במדרשת בן-גוריון, שנמצאת בלב רמת הנגב (ראה תאור מפורט של **האקלים המקומי**). השכונה מורכבת מ-79 בתים פרטיים (ראה איור 14.1), וייחודה טמון באמצעים הבלתי שגרתיים ששולבו בתכנית המתאר ובתקנון הבניה שלה. התכנון נעשה תוך ניסיון לעודד בניה חוסכת אנרגיה, וליצור סביבה מבונה שתהיה נוחה ומודעת אקלים. משום שנווה צין הוגדרה כשכונת "בנה ביתך" – כאשר כל בית תוכנן עבור בעל המגרש על ידי מתכנן שנבחר על ידו – תפקיד התכנית היה בעיקר להנחות את התכנון המפורט, וליצור מסגרת שבתוכה המתכננים הבודדים יוכלו ליישם את העקרונות הכלליים. תכנון השכונה התחיל בשנת 1984, והבתים הראשונים אוכלסו ב-1990.

מטרות התכנון

בין המטרות של המתכננים והמשתכנים הייתה השאיפה ליצור שכונת מגורים מודרנית ואיכותית, אשר "טביעת הרגל הסביבתית" שלה תהיה מצומצמת ככל האפשר. הניסיון לממש מטרה זו דרש התייחסות לתכנון הבית הבודד ותפקודו התרמי, כמו גם לתכנון של מרקם בנוי ידידותי להולכי רגל וחסכוני במשאבים.

תפקוד הבית הבודד – מאחר שאזור שדה בוקר מתאפיין בחורף קר אבל עם ריבוי ימים בהירים, ישנה הזדמנות פז לניצול אנרגיית השמש לשם חימום הבתים, אך קליטה ישירה של קרינת שמש בפתחי המבנים דורשת נגישות שמש בשעות היום המכריעות ביום חורף. לכן, אחת המטרות הבולטות בתכנון הכללי הייתה להבטיח "זכויות שמש" לכל בית בשכונה. לעומת זאת, בקיץ, השעות החמות של היום מלוות בלילות קרירים ורוחות יחסית חזקות. שילוב זה של תנאים מהווה גם הוא הזדמנות לניצול אנרגיה טבעית. במקרה זה מדובר בקירור מעטפת הבית באמצעות "אוורור לילה" – ולשם כך נקבעה מטרה של הבטחת נגישות לרוח.



איור 14.2. תכנית כללית של שכונת נווה הצין. מודגשים סוגי הדרכים השונים, וארגוני המגרשים במקבצים.

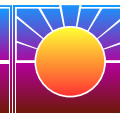
שבילים להולכי רגל משלימים את מערכת התנועה בשכונה, בצורה של סמטאות צרות (ברוחב 2-3 מ' בלבד). הכיוון של צירי השבילים, יחד עם דרכי הכניסה המשניות לבתים, הוא בעיקר צפון-דרום – והשביל תחום משני צדדיו בחומות בנויות המפרידות בין המגרש הפרטי לבין השטח הציבורי. גובה החומה מוגדרת בתקנון הבניה כ-2.25 מ' לכל היותר (ולפחות 0.75 מ'), וחובה על בעלי המגרשים להקים חומות

רחובות משולבים מאפשרים גישה לתנועת רכב מהכביש הסמוך לשכונה ועד הכניסה לכל מגרש לאורכם (הנגישות ברכב לכל בית הייתה דרישה של המשתכנים המייסדים). לרחובות אלה אין מדרכות ולמעשה התנועה בהם משותפת לנהגים, הולכי רגל, רוכבי אופניים וכו'. כדי למתן את התנועה הממונעת למהירות בטיחותית (של 25 קמ"ש לכל היותר), הרחוב מתוכנן עם ריצוף מאבנים משתלבות וערוגות לאורכו שיוצרות מיסעה מצומצמת ומפותלת. רוכבם של הרחובות המשולבים נקבע על פי המידה המזערית הנדרשת למעבר כלי רכב בשני הכיוונים – בערך 6 עד 8 מ' – בכפוף הדרישות לרכב חירום. (ראה איור 14.3 בצד ימין).

רוב הרחובות המשולבים תוכננו כך שציר האורך שלהם מכיוון מזרח-מערב. לכן, הרחוב הנדרש לתנועת רכב קובע את המרחק המינימאלי בכיוון צפון-דרום בין המגרשים הסמוכים לרחוב, וכפי שמתואר בהמשך, מרחק זה מסייע בהבטחת נגישות שמש לחזיתות הדרומיות של המבנים לאורך צדו הצפוני של הרחוב. בנוסף למגרשים הסמוכים לרחוב, ישנם מגרשים בשורה עורפית, והגישה אליהם מסופקת מהרחוב דרך כניסות קצרות וצרות בכיוון הניצב לו. סידור זה מאפשר מרקם בנוי יותר קומפקטי מאשר הסידור השגרתי יותר, שבו כל המגרשים נמצאים בסמיכות אל הרחוב כדי לספק גישה אליהם באופן ישיר.



איור 14.3. רחוב משולב במבט לכיוון מערב (ימין), ושביל להולכי רגל במבט לכיוון דרום (שמאל). מרבית הרחובות מכונים עם צירם לכיוון מזרח-מערב, כאשר הרחוב הדרוש לתנועת רכב בשני הכיוונים תורם להרחקת הבתים בכיוון צפון-דרום ולהבטחת נגישות שמש בחורף. השבילים מכונים לרוב על ציר צפון-דרום, כאשר הקירות המזרחיים והמערביים הסמוכים מטילים צל בתוך השביל בשעות הבוקר ואחר הצהריים בקיץ. פרגולות עם צמחיה מטפסת מוסיפות הצללה בשעות שיא (קרוב ל-12 בצהריים).



איור 14.4. ארגון המגרשים במקבצים של ארבעה, כאשר כל מבנה נוגע בפינה החיצונית של מגרשו.

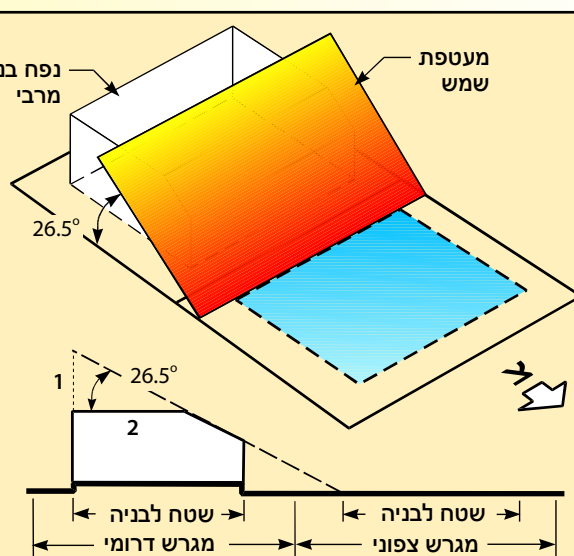
- הבתים מורחקים אחד מהשני בכיוון צפון-דרום, ובכך המנגנון תורם לנגישות שמש בחורף.
- הבתים מורחקים אחד מהשני גם בכיוון מזרח-מערב, ובכך המנגנון תורם לנגישות רוח בערבי קיץ.
- קירות מזרחיים ומערביים של המבנים מקורבים לשבילים, ובכך המנגנון תורם להצללה בקיץ.

(3 מעטפת שמש – כאמור, תכנון השכונה מעודד חשיפה של חזיתות דרומיות לשמש חורפית בכמה דרכים (כגון רוחב הרחובות המזרחיים-מערביים, ונקודת ה-"P" במקבץ המגרשים). בנוסף, תכנון הבניה מבטיח באופן מפורש שתהיה נגישות שמש

לאורך השבילים. בנוסף, התקנון מעודד את הקרבה של המבנים בשני הצדדים אל השביל (כמפורט למטה). בכך נוצר חתך "קומפקטי" שבקיץ מבטיח הצללה בתוך השביל (ובמקרים רבים גם על גבי חזיתות המבנים) – בשעות הבוקר מהחומות וקירות המבנים בצד המזרחי, ובשעות אחר הצהריים מהצד המערבי. פרגולות לאורך חלק מהשבילים שנושאות צמחיה מטפסת מוסיפות צל בצהריים.

השילוב של שבילים צרים ועמוקים לצפון-דרום עם רחובות לכיוון מזרח-מערב מהווה דוגמא של מרקם בנוי "סלקטיבי" (ראה חתך הרחוב) שמטרתו להעניק תנאים אקלימיים מועדפים בעונות השונות, מבחינת הנוחות של הולכי רגל וגם מבחינת התפקוד היעיל של הבתים עצמם.

(2 מקבץ המבנים – כחלק מתכנית המתאר, המיקום של כל מבנה מוגבל בתוך המגרש שלו. בניגוד לגישה המקובלת שעל פיה הבית ממוקם באמצע המגרש – מצב שיוצר חצר פרטית קדמית ואחורית אבל מותיר מעט שטח בין הבתים – בנווה צין תוכננו מקבצים של ארבעה מגרשים, כאשר הבית ממוקם בפינה החיצונית של המקבץ (ראה איור 14.4). בהעדר תכנון מפורט של הבתים מראש, דגם זה נקבע בתכנית המתאר באמצעות נקודת "P" שמסומנת בפינת קווי הבניין של המגרש, ודרישה שעליה מעטפת הבית חייבת לעמוד. מנגנון זה מקדם מספר מטרות:



איור 14.5. מנגנון גיאומטרי שמוגדר בתכנון השכונה מביט "זכויות שמש" לכל מגרש בחורף. המישור הדמיוני (מעטפת השמש) שמגביל את נפח המבנה עולה מקו הבניין של השכן הצפוני, בשיפוע של 1:2 (הגובה מוגבל למחצית המרחק).



איור 14.6. גינן אינטנסיבי מוגבל לאזורי פעילות מצומצמים, כאשר הדשא מוגן ע"י עצי צל ומוקף במבנים.

מלאה בשעות היום בחורף, לכל חזית דרומית, וזה באמצעות מנגנון מיוחד לשמירת "זכויות שמש". מנגנון זה מגדיר מישור משופע דמיוני מעל כל מגרש ("מעטפת שמש"), ואסור שהמבנה יבלוט מעליו (ראה איור 14.5). המישור עולה מקו הבניין הדרומי של המגרש הסמוך מצפון, בשיפוע של 1:2 (כלומר, גובה הבניה המותרת בכל נקודה במגרש תהיה עד מחצית מהמרחק אל קו הבניין הדרומי של השכן). הזוית חושבה כך שתובטחנה זכויות שמש בין השעות 8:30 ו-14:30 ב-21 בדצמבר, ובכך יתאפשר חימום סולרי במשך מרבית השעות בחורף.

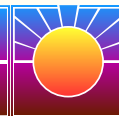
4) גינן ציבורי – גודל השטחים הפתוחים ואופי הטיפול בהם הונחו על ידי מספר שיקולים הקשורים במגבלות האקלים המדברי. קרקע חשופה, שאינה מטופלת בגינן או בריצוף, נוטה להפוך למקור אבק ומטרד בשטח השכונה. לעומת זאת, כיסוי ירוק של שטחים נרחבים מונע ריכוזי אבק אבל דורש כמויות משמעותיות של מים להשקייתו. לכן, רוב השטחים הפתוחים בשכונה מרוצפים באבנים משתלבות, והשטחים הירוקים מצומצמים בגודלם ומוגנים על ידי עצי צל ומבנים סמוכים. גינן אינטנסיבי מוגבל לאזורים שבהם הפעילות במקום מצדיקה את ההשקעה (למשל, שטח מתקני משחקים סמוכים למועדון שכונתי הכולל מדשאה קטנה ועצי צל, ומוקף בבתים מסביב).

האקלים המקומי – מדרשת בן-גוריון (אזור שדה בוקר):

מדרשת שדה בוקר נמצאת בלב רמת הנגב (קו רוחב 30.8° צפון, רום 475 מ' מעל פני הים), בדרום הארץ. האקלים המקומי מתאפיין בימי קיץ חמים ויבשים, וימי חורף קרים אך בהירים לרוב. יחד עם ההבדלים הקיצוניים בין קיץ לחורף, יש בכל עונות השנה תנודות טמפרטורה גדולות בין יום ולילה.

בחודש יולי הטווח היומי הממוצע הינו 17-32 מ"צ, כאשר האוויר החם בשעות היום הנו גם יבש (עם לחות יחסית של כ-30% בשעת שיא) וגם מלווה בשמיים בהירים וקרינת שמש חזקה (כ-7.5 קו"ש למ"ר ליום). בקיץ ישנה רוח חזקה וסדירה בשעות אחר הצהריים והערב, שנושבת מכיוון צפון-מערב ונושאת לעיטים קרובות כמויות גדולות של אבק. כתוצאה מההתקררות המהירה בשעות הלילה ומוקדם בבוקר, נוצרת כמות משמעותית של טל.

בחורף יש ריבוי של ימים בהירים, אבל הלילות קרים, והטמפרטורות יורדות לעיתים קרובות מתחת ל-5 מ"צ. לכן הצורך בחימום הינו משמעותי, ומסתכם בכ-1100 ימי מעלות הסקה (ימ"ה - על בסיס טמפרטורת ייחוס של 18.3 מ"צ). כמות המשקעים קטנה יחסית (כ-85 מ"מ גשם לשנה) והאידיוי הפוטנציאלי השנתי הוא מעל 2000 מ"מ – ולכן, האזור מוגדר כצחיח וצריכת המים להשקיית צמחי גינן הינה גבוהה במיוחד.



רמות ג', פלח D, באר-שבע

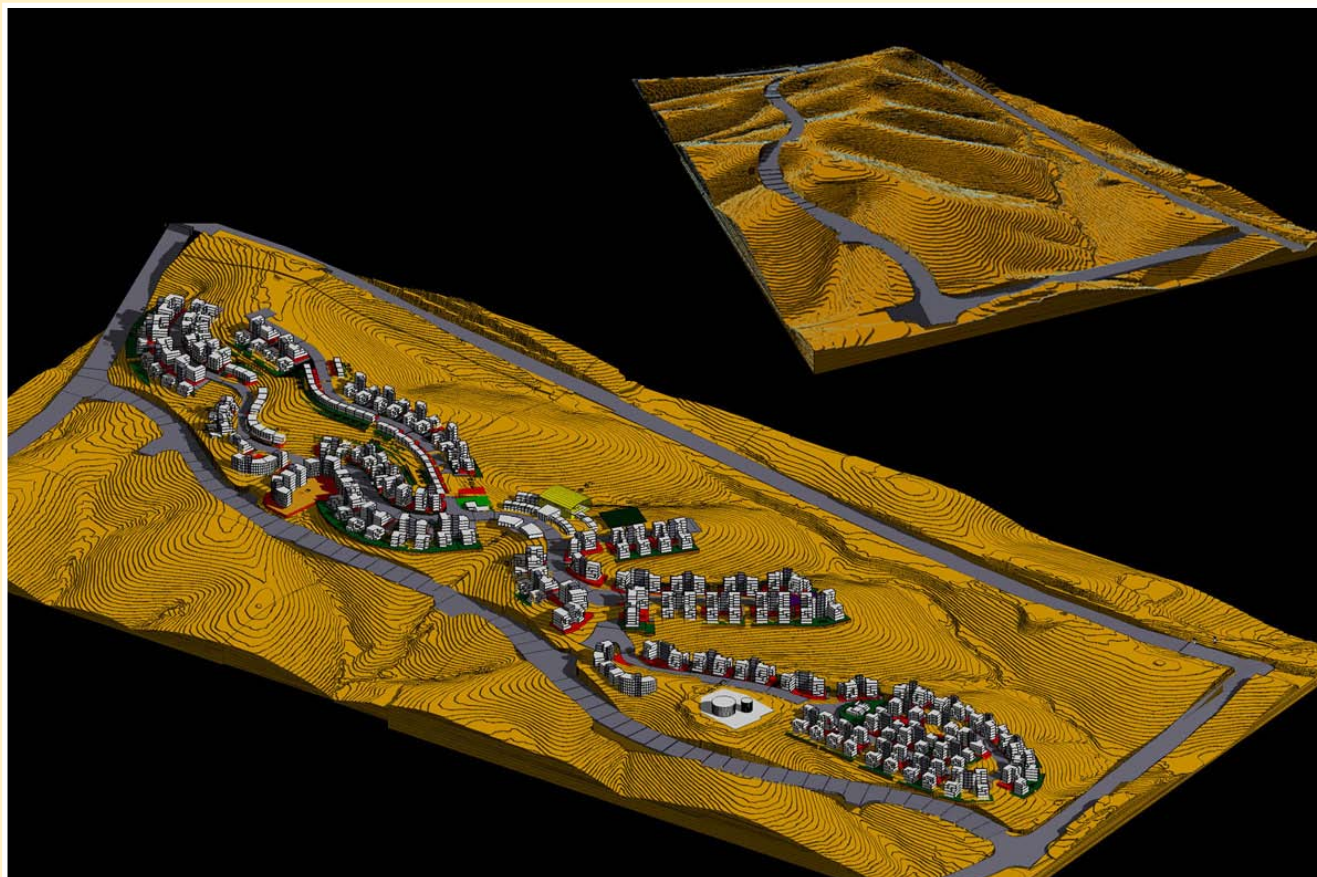
התייחסות תכניות המתאר ותכניות בניין העיר לנושאי סביבה אינה טריוויאלית, בין היתר בשל האילוצים הרבים: סביבתיים, תקנוניים ואחרים. לעיתים רבות הטופוגרפיה מכתיבה תנוחת כבישים – ועל כן גם העמדת בניינים – בהפניות בעיתיות בהתייחס לכיוונים הרצויים לחשיפה לשמש ולרוח. במקרה של תכנית המתאר של שכונת רמות ג' פלח D בבאר שבע, נעשה ניסיון להתגבר על מגבלות השטח מבלי לוותר על הפן האקלימי, הסביבתי והאנרגטי ברמת יחידת הדיוור.

התכנית כוללת כ-900 יחידות דיור במספר טיפוסים בניינים – חד משפחתיים, קוטג'ים (טוריים או מדורגים), בתי דירות טוריים ובנייני H. גובה הבניינים נע בין קומה לבין חמש קומות מעל מפלס הכניסה. כמו כן ישנם בשכונה בית ספר יסודי, גני ילדים, מעון יום ומרכז מסחרי רובעי קטן. השטח מורכב מרכס המתפרש מצפון לדרום שמדרונותיו מחורצים על ידי ואדיות בכווני צפון-מזרח – דרום-מערב, וצפון-מערב

–דרום-מזרח. מספר נקודות בתכנית היו נתונות, ביניהן הכביש הבין רובעי על הרומים שלו, אשר קבעו נקודות חיבור עם פלח D, ועל כן גם תנוחה של כבישים בתוך הפלח עצמו.

בעוד שהבניינים הקטנים יותר קלים יחסית להתאמה, אלה בעלי מספר קומות, ובמיוחד אלה בעלי שלוש או ארבע יחידות דיור בקומה, מציבים אתגר לא פשוט בחשיפה שוויונית לשמש ולרוח. הטופוגרפיה הלא מישורית שמשא בעיצוב בניינים בעלי תכנית סטנדרטית לכאורה (בניין מטיפוס H) אך חתך לא אחיד, כך שגוש אחד של הבניין עולה מעל הכביש ואילו גוש אחר יורד מתחתיו, תוך הקפדה על חשיפת כל היחידות לשמש חורפית ורוח קיצית מיטביות. (במקרים כאלה חתך הבניין הכולל מגיע לכדי שמונה קומות ויותר, אם כי תמיד נשמר העיקרון של חמש קומות לכל היותר בכל גוש.) בנוסף לניצול הטופוגרפיה להשגת מטרה זו נעשה שימוש בדירוג הקומות, כך שניתן היה לרווח את הגושים השונים של כל בניין, תוך יצירת מגוון גדלי דירות.

הבטחת זכויות השמש והרוח נעשתה תוך ניצול של



איור 14.7. שכונת רמות, באר שבע: הטופוגרפיה כגורם מעצב.



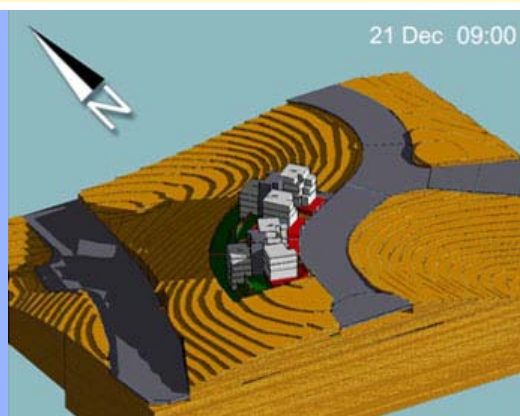
מבט אקסונומטרי על החלק הדרומי של הפלח ב- 21 בדצמבר בשעה 12:00



היכולות של תכנת התכנון בה תוכנן הפרויקט, יכולות שכיום יש לרוב תכנות התכנון והשרטוט. הדמיית הצל אפשרה לבדוק את יחסי הגושים של כל בניין ובניין, כמו גם את אלה בין בניינים סמוכים וקבוצות של בניינים משני צידי כביש. בהמשך לכך הותאם התכנון כדי להבטיח למירב יחידות הדיור זכויות שמש מיטביות בחורף. במקרים בהם הטופוגרפיה ותנחות הכבישים חייבו סטייה מהדרום של יותר מכמה מעלות בודדות, נבדקה ההתנהגות התרמית של יחידות הדיור בעלות נגישות פחות ממיטבית כדי לכמת את תוצאות צמצום החשיפה לשמש.

איור 14.8. שכונת רמות, באר שבע - זכויות שמש במרקם עירוני.

החשיפה לרוח הייתה קלה יותר להתמודדות, מאחר שסטייה של פתח עד כדי 45° מהניצב לכיוון הרוח השלטת עדיין מאפשרת אוורור יעיל. גם כאן נבדקו הפניות כל הדירות בהתייחס לכיווני הרוח השלטת בלילות הקיץ ובעונות המעבר. כן נבדקה גיאומטריה ההסתרה האפשרית על ידי גושי הבניין עצמו, ובניינים שכנים. חירוף הרכס הווה במקרה זה יתרון אשר אפשר רוח של מסת הבנייה ותיעול הרוח בין גושי בניינים סמוכים.



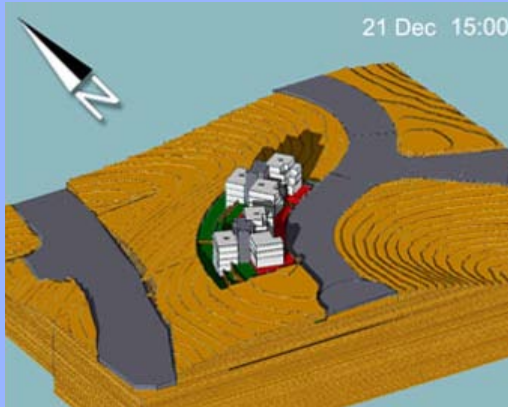
21 Dec 09:00



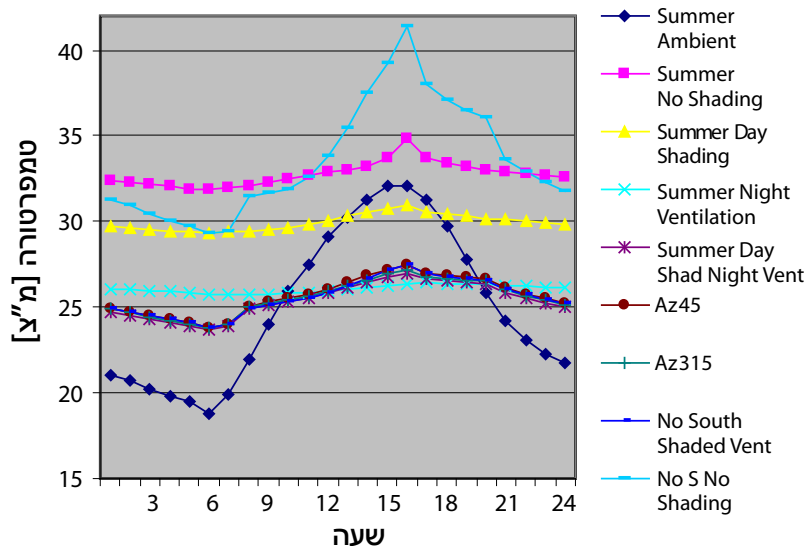
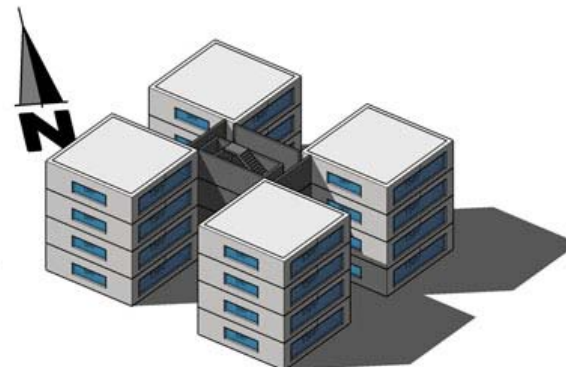
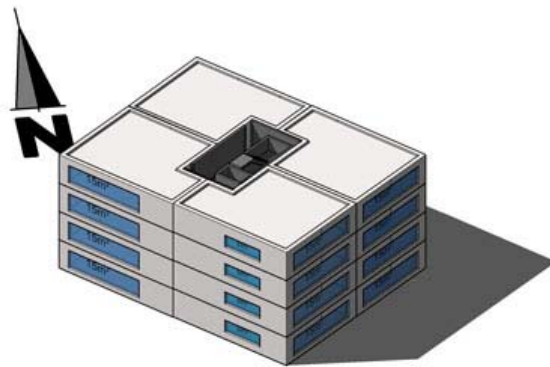
21 Dec 12:00

איור 14.9. שכונת רמות, באר שבע - בניין T.

הדמיית הצל ב-21 בדצמבר,
(בכיוון השעון משמאל):
09:00, 12:00, 15:00

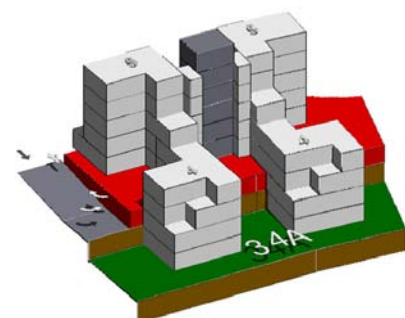
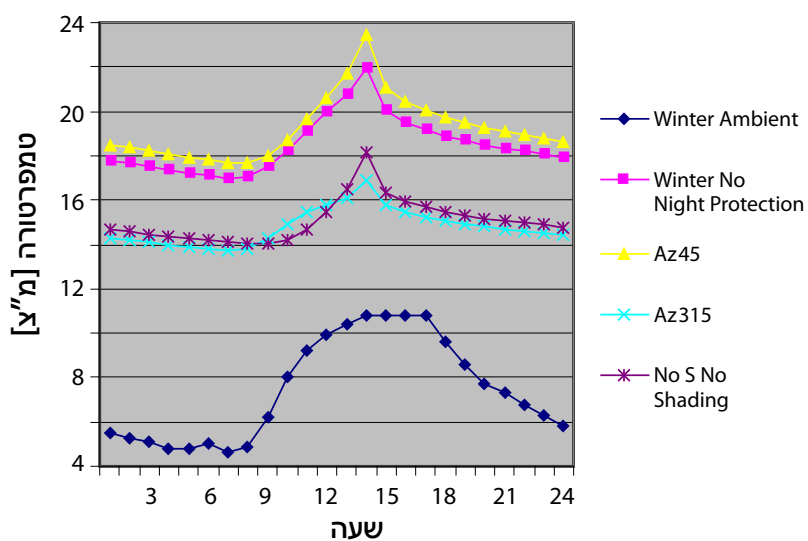


21 Dec 15:00



איור 14.10. שכונת רמות, באר שבע - בניין H "משוך" (מימין) ובניין H קומפקטי.

הגרפים משמאל מראים תוצאות של הדמיות תרמיות עבור הטיפוסים הללו תוך בדיקה של השפעת שינוי האזימות, וצורות תפעול שונות (קיץ - למעלה - ללא הצללה ועם הצללה בשעות היום, אורור לילי, וכדומה; חורף - למטה - עם ובלי חזית דרומית, עם ובלי סגירת תריסים בלילה).



בניין מטיפוס H בעל פיר שירות אחד אך גושים מרוחקים אלה מאלה להבטחת זכויות שמש ורוח.

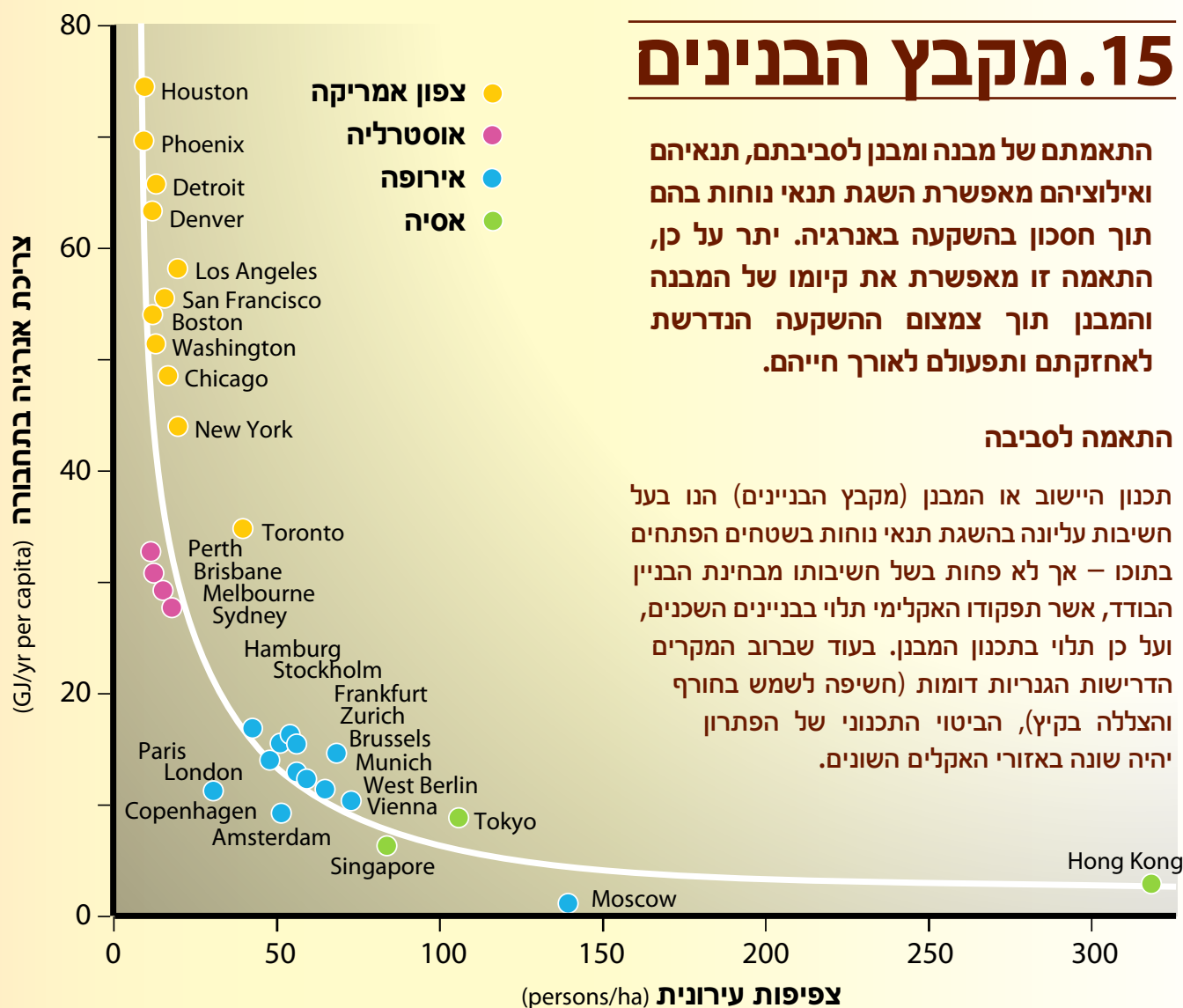


15. מקבץ הבנינים

התאמתם של מבנה ומבן לסביבתם, תנאיהם ואילוציהם מאפשרת השגת תנאי נוחות בהם תוך חסכון בהשקעה באנרגיה. יתר על כן, התאמה זו מאפשרת את קיומו של המבנה והמבן תוך צמצום ההשקעה הנדרשת לאחזקתם ותפעולם לאורך חייהם.

התאמה לסביבה

תכנון היישוב או המבן (מקבץ הבנינים) הנו בעל חשיבות עליונה בהשגת תנאי נוחות בשטחים הפתחים בתוכו – אך לא פחות בשל חשיבותו מבחינת הבניין הבודד, אשר תפקודו האקלימי תלוי בבניינים השכנים, ועל כן תלוי בתכנון המבן. בעוד שברוב המקרים הדרישות הגנריות דומות (חשיפה לשמש בחורף והצללה בקיץ), הביטוי התכנוני של הפתרון יהיה שונה באזורי האקלים השונים.



איור 15.1. היחס בין הצפיפות העירונית וצריכת אנרגיה לתחבורה עירונית לתושב, בערום שונות בעולם.^[61]

צפיפות עירונית וצפיפות בינוי

לצפיפות הבנייה השפעות רבות על התיפקוד האנרגטי של ישובים ובניינים. צפיפות גבוהה יותר ברמת היישוב מגדילה את האפשרות להסתמך על הליכה ברגל ורכיבה באופניים כאמצעי תנועה מרכזיים (מערכת התנועה), היא מאפשרת הגנה של בניינים זה על זה מרוחות, הקטנת המעטפת שלהם ועל כן הקטנת איבוד האנרגיה. מנגד יש לה השפעה על החשיפה של המבנה הבודד לקרינת שמש ולאוויר, ועל כן גם השפעה אפשרית על בריאות הציבור.

הרקע המחקרי אודות התנהגותם התרמית והאקלימית של בניינים בודדים הנו עשיר יחסית. ברם הידע אודות האקלים השורר בין הבניינים הנו כללי יותר, ונמצא בשינוי מתמיד המתבטא במחקרים הנערכים ברחבי העולם. יתר על כן, בשנים האחרונות מתקיים דיון אודות שינויים אקלימיים והאופן בו אלה משפיעים וישפיעו בעתיד על הבנייה. דיון זה מתמקד בין היתר בנושאים של בצורת והצפות, סופות אבק ושלגים ועוד.

הפרקים הבאים עוסקים במספר מדדים ספציפיים בנושאים אלה, ובמספר עקרונות פחות מדויקים אך לא פחות חשובים.

61. Newman and Kenworthy, 1999.



איור 15.2. בנייה גבוהה וצפופה מיצרת קניונים עירוניים בהם יש עוצמת אור נמוכה, אוורור לקוי, לכידה של חום ומזהמים, ורעש, בתמונה מרכז מהנטן, ארה"ב (צילום: יצחק מאיר).

וגובה השמש ביום הקצר של השנה – 21 בדצמבר (בשעות 09:00 ו-15:00). כך, בניין בן 6 קומות יהיה בעל גובה של כ-18 מ', ויטיל בצפון צל באורך של 32 מ'. בנתונים אלה ניתן עדיין ליצר מרקם עירוני סביר תוך שימוש בכלים תכנוניים וביניהם ניצול הפרשי גובה, קומת חנייה, קומה מסחרית ועוד, אשר יאפשרו לקבל נגישות שמש בכל הדירות. כאשר בניין עולה על גבהים קרובים למוזכר, נפגעות זכויות השמש של הבניינים השכנים, או שנוצא מרקם עירוני לא סביר ולא אנושי. כך בניין בן 20 קומות יטיל צל באורך של 120 מ', ואילו צלו של בניין בן 30 קומות יגיע לאורך של 180 מ'. אלה, אגב, אינם גבהים חריגים לנוף המתפתח באזור המרכז, הכולל בניינים גבוהים מ-250 מ', המצלים על שכיניהם באופן מוחלט.

היבט נוסף של הבנייה הגבוהה הוא האקלים העירוני. הרחובות שבין הבניינים הגבוהים דומים לקניונים ועל כן מכונים **קניונים עירוניים** בהם נוצרים תנאים אקלימיים ייחודיים ובעייתיים בחלק מהמקרים, בין היתר בשל אגירה של אנרגיה שמש נכנסת, הגבלה של פליטת האנרגיה האגורה, כליאת מזהמים ועוד.^[62] תנאים אלה מזוהים עם תופעת **אי החום העירוני** המהווה גורם מפריע באזורים בעלי אקלים חם או ממוזג, הן בשל השפעתו על צריכת האנרגיה בבניינים בכלל, והן בשל

צפיפות המרחב המבונה מהווה פרמטר חשוב ביותר מבחינת הפוטנציאל לחסכון באנרגיה מחד, ומאידך מבחינת בריאות הציבור. הצפיפות נקבעת בדרך כלל על פי שיקולים כלכליים ותרבותיים, כגון ערך הקרקע והרצון למזער עלויות של תשתיות עירוניות ליחידת דיור או למטר רבוע של שטח בנוי, ומנגד הרצון לפרטיות ולשטח פתוח פרטי. במקביל ומנגד קיימים שיקולים של שמירה על שטחים פתוחים לטבע וחקלאות, והקטנת ההתפשטות העירונית. בארץ, שבה הקרקע נחשבת כמשאב הנתון ביותר במחסור, הוכר הצורך הלאומי להגדיל את הצפיפות היישובית, ותמ"א 35 אף הגדירה צפיפויות נטו מזערית ליישובים השונים.

נהוג לחשוב כי צפיפות עירונית גבוהה משמעותה בהכרח בניה לגובה. אך אין הדבר כך כלל ועיקר. פריז וברצלונה, שתיים משלושת הערים הצפופות באירופה, הנהנות הן מצפיפות גבוהה והן מאיכות חיים גבוהה מאד, מבוססות בעיקר על בניה בגובה מרבי של 6-8 קומות. גם כמה מהאזורים הצפופים בארץ מאופיינים בבנייה הנעה ברובה בין 3 ל-6 קומות: העיר בת-ים, הצפופה בארץ מבחינת יח"ד לקמ"ר, העיר בני-ברק (הצפופה בארץ במספר נפשות לקמ"ר), שכונת פלורנטין בתל-אביב (השכונה הצפופה בארץ), ואזור הצפון הישן בתל-אביב שהוא אחת השכונות הצפופות בארץ, ועם זאת אחת היקרות ביותר. המפתח להשגת צפיפות גבוהה טמון בצורת בינוי שאיננה בזבזנית בשטחים פתוחים (ציבוריים ופרטיים), בעלת רחובות רבים אך צרים יחסית, ובבינוי היקפי סביב הבלוקים, המאפשר נגישות טובה וחיי רחוב פעילים (ראה **מערכת התנועה**).

לעומת זאת, התפיסה המקובלת בארץ משתמשת בצורך להגדלת הצפיפות כדי להצדיק בניית בנייני מגורים ומשרדים גבוהים מאוד. את תוצאות התייחסות זו ניתן לראות בכל המרחב של גוש דן, ובמרכזי ערים נוספות בכלל, בהן נבנים מגדלים במספרים הולכים וגדלים. מגדלים אלה העולים בגובהם בעשרות מטרים על הבניינים השכנים, חוסמים את השמש והרוח משכניהם. אם אחד החסמים בבנייה ביו-אקלימית הוא **נגישות שמש** בחורף, אזי את המרחק ביו הבניינים יש לקבוע לפי כלל האצבע של צל באורך פי 2 מגובה הבניין המטיל אותו (בהתחשב בקו הרוחב של ישראל,

62. Ratti et al., 2003.



שהבנין נבנה בקו בנין 0, ושמפלס הקומה הראשונה שווה לגובה הרחוב. מסובך אף יותר הוא הטיפול בצדדים המזרחי והמערבי של הבלוק העירוני, אשר יש צורך לעבדם בצורה מיוחדת כדי לספק נגישות שמש לקומותיו.

ההתייחסות התכנונית לבנייה הצפופה תיעשה תובענית יותר עם הזמן, זאת בשל הגידול המתמיד של אוכלוסיית העולם, ובמיוחד זו העירונית. בכמחצית המאה האחרונה האוכלוסייה העירונית בעולם גדלה פי 4, והנחת העבודה היא כי ברבע הראשון של המאה ה-21 יותר מ-60% מאוכלוסיית העולם יהיו אוכלוסייה עירונית. ישראל חווה תהליכים דומים ואף קיצוניים מהממוצע, זאת בשל גודלה הקטן יחסית, והריכוז הגבוה של האוכלוסייה בחלק קטן של הארץ. בתנאים אלה חיוני לתת את הדעת לחשיפה לשמש ולרוח של הבנין הבודד ושל השטחים הפתוחים.

המלצה: קביעת הצפיפות בתכנית של מבן, שכונה או יישוב תשאף להשיג צפיפות מספקת כדי לתרום לציפוף הכולל של היישוב, לאפשר מגוון של יעדים בטווח הליכה, ושירות בתחבורה ציבורית. ברמת המבן יש להביא בחשבון את הצורך בחשיפה לשמש ולרוח של כל הבניינים הבודדים ושל השטחים הפתוחים. ככלל, עדיף לפתח את המבן באמצעות מבנים היקפיים המגדירים מצד אחד את הרחובות שבהיקפו, ומצד שני שטחים פתוחים במרכז. יש לתכנן את המרחקים בין המבנים, בהפניות השונות של המבן, כך שלכל מבנה יובטחו זכויות שמש ואורור.

* * *

יש להביא בחשבון את המשמעות החברתיות של טיפוס בינוי שונים (טיפוסי בניינים), להעמיד את הבניינים כך שייצרו שטחים פתוחים שימושיים לפרט ולציבור, ושיגדירו רחובות באופן שיאפשר הצללה בקיץ, אוורור, וחשיפה לשמש לפחות בחלק מן היום בחורף.

איכות אוויר ירודה בחוץ המשפיעה על איכות האוויר בפנים המבנים.

גם באזורים של בנייה נמוכה ישנה נטייה לצופף את המבנים, תוך הצרת חזית המגרש לרחוב, כך שהיחס בין מספר המגרשים ליחידת אורך של דרך ציבורית (ועל כן גם ליחידת אורך של תשתיות ציבוריות) גדול ככל האפשר. במקרה זה נוצרים לרוב תנאים ירודים של חשיפה לשמש ולרוח, וגם בעיות של פרטיות, אקוסטיקה ירודה ועוד.

לעומת זאת, הערכה של שיקולים כלכליים נוספים לעלויות הקרקע הקשורים בהפעלת המבנים כמו עלויות לחימום וקירור, לתאורה ועוד, יכולה להראות כי יש חסכון משמעותי בעלויות אלה אם תכנון המבן מאפשר חשיפה מרבית של המבנה היחיד לשמש חורפית (זכויות שמש) ולרוח קיצית בשעות הלילה (זכויות רוח).

מרטין ושות' מצאו בניתוחים עירוניים מתמטיים כי הצורה הקומפקטית ביותר המאפשרת נגישות לאור ולרוח מצד אחד, ומיצוי מרבי של צפיפות הבינוי היא בינוי המקיף חצר פנימית.^[63] אין זה פלא אם כך, כי ערים מסורתיות, אשר היו מוגבלות בגובה הבינוי ובמרחב ההתפשטות שלהן, מסיבות של נגישות, טכנולוגיה, וצרכים הגנתיים, הגיעו כמעט כולן לסוג זה של בינוי כדרך למצות את הצפיפות במרחב העירוני המוגבל. גם מבחינה חברתית וכלכלית, בינוי היקפי סביב המבן, היוצר מרחבים ציבוריים מוגדרים ברחובות, מצד אחד, ומגדיר מרחבים פרטיים בפנים המבן מצד שני, נראה כאופטימיזציה של המרחב העירוני.

עם זאת, ישנו ניגוד מסוים בין המבנה העירוני הנוצר משיקולים של גובה מבנים ונגישות שמש, ובין המבנה הרצוי מבחינת יצירת קישוריות מיטבית. בניינים בגובה של 8 קומות, הנמצאים על ציר מזרח-מערב, יוצרים צורך במרחב של כ-50 מטר רוחב מצפון להם כדי לאפשר נגישות שמש מלאה לשורת הבניינים הבאה. הבעיה היא שרחוב ברוחב 50 מ' הוא רחב מדי. בהנחה שרוחב הרחובות בכיוון מזרח-מערב הוא הרחב יותר (צורת הרחוב), רוחבם יהיה בין 16 – ל-20 מ', רוחב המאפשר בניינים בגובה מרבי של 8-10 מ' (כלומר 2-3 קומות) בגדה הדרומית של הרחוב (זאת בהנחה

63. Martin and March, 1972



א. שיקולים כלכליים

- עלות קרקע
- עלות הקמת המבנה על מערכותיו השונות
- עלות אחזקת המבנה
- עלות הקמת תשתיות/מערכות עירוניות ואחזקתן (כבישים וחנייה, ביוב, טלפונים, חשמל, שטחים פתוחים וכדומה)

ב. שיקולים אנרגטיים

- תשומת אנרגיה בתהליך ההקמה
- תשומת אנרגיה לאחזקה
- כדאיות של מערכות לניצול אנרגיה חליפית (למשל, מערכות סולריות פסיביות לחימום מים אינן אפשריות מעל גובה בניין מסוים ודורשות גיבוי מכני)
- השפעות המבנה הפיסי על המיקרו-אקלים של השכונה/היישוב (נגישות שמש/הצללה, הגנה מרוחות/אוויר)

ג. שיקולים חברתיים/אסתטיים

- אופי השכונה/היישוב – צפיפות; יחס של שטח בנוי לשטח פתוח; אופי השטחים הפתוחים
- השפעות הארגון המרחבי על תפקוד הפרט והקהילה – תמהיל טיפוסי בניינים שונים מקדם עירוב של אוכלוסיות שונות – גילאים, מצב משפחתי, רמת הכנסה וכדומה, אשר מאפשר קיום שירותים שונים, שימוש בשטחים המשותפים על פני היממה ע"י אוכלוסיות שונות, ומניעת היווצרות שכונות הומוגניות בהן שירותים שונים (גני ילדים, בתי ספר) יוצאים משימוש עם הזדקנות האוכלוסייה.



איור 15.3. פרויקט המראה תמהיל טיפוסי בניינים – חד-ודו-משפחתיים, טוריים ובנייני קומות – תוך שמירה על זכויות שמש מלאות וכולם. הפרויקט – שכונה סולארית במצפה רמון – תוכנן על מדרון עם פנות צפונית, במסגרת תחרות תכנון שהוכרזה על ידי משרד התשתיות הלאומיות ומשרד הבינוי והשיכון (היחידה לאדריכלות מדברית, 1983).

טיפוסי בניינים

שילוב של בתים חד-משפחתיים ודו-משפחתיים צמודי קרקע עם בתים טוריים או משותפים בני שלוש עד שש קומות הוא מיטבי מבחינת אנרגיה וניצול קרקע, עלויות בנייה ואחזקה של מבנים ותשתיות. לעומת זאת, בנייה לגובה הינה בעייתית בגלל הפרעות סביבתיות (יצירת זרמי אוויר חזקים בקרבת בניין גבוה והטלת צל בעל שטח גדול על ידו) והפרעות תפקודיות הנוצרות על ידי המבנים רבי הקומות.

השיקולים האנרגטיים והכלכליים נעשים בשתי רמות: רמת המשק הלאומי ורמת הפרט. לא תמיד טובת המשק ותועלת הפרט עולות בקנה אחד. לדוגמה, שיפורים בזמן הבנייה (תוספת בידוד, הורדת מספר חילופי האוויר בבניין) ישפרו בטווח הארוך את ביצועיו האנרגטיים של הבניין ויביאו תועלת למשק הלאומי, אך ייקרו את ההוצאה הראשונית של הבנייה. לעומת זאת ייתכן שהפרט הבונה יעדיף לבנות בניין "בזבזני" מבחינת אנרגיה כדי להוריד את המחיר ההתחלתי, מתוך נכונות לפרוס את שאר ההוצאות על פני "תקופת החיים" של הבניין.

המלצה: מרקם עירוני המכיל טיפוסי בניינים שונים, בעלי גובה, גודל דירה, טיפוסי דירה, ושטח פרטי צמוד משתנים, עדיף על מרקמים הומוגניים. תמהיל עשיר יאפשר יצירה של תנאים מתאימים לקיום זכויות שמש ורוח, למתן איכויות דיור שונות המתאימות לאוכלוסיות שונות, ובכל יבטיח יצירת אזורים עירוניים המיישמים ערכי קיימות חברתית וסביבתית.



איור 15.4. בניית שטיח, שיכון ה' לדוגמה, באר שבע (צילום יצחק מאיר).

קומות או מפלסים) הצמודות ליחידות שכנות בקירות משותפים. הצמדה זו מקטינה את שטח המעטפת החשוף לתנאי חוץ. צפיפות הבנייה מאפשרת גם בקרה אקלימית על השטחים הפתוחים הפרטיים והציבוריים. גובהם הנמוך יחסית של המבנים מאפשר הגדלת הצפיפות תוך שמירה על זכויות השמש של המבנים והשטחים הפתוחים הסמוכים.

למרות כל הנאמר לעיל, במקרים רבים החלטות תכנוניות או אחרות מחייבות ביסוס מבנן על טיפוס הבית החד-משפחתי. למשל, בנייה מסוג זה אופיינית לשכונות "בנה ביתך". במקרים אלה יש צורך בטיפול נכון בכל רמות התכנון כדי למנוע היווצרות בעיות אקלימיות בתוך הבניינים ובסביבתם. ניסיון בתכנון נכון של שכונות מסוג זה הוא שכונה שהוקמה במדרשת בן-גוריון (ראה **שכונת נווה צין**).

באזורים נרחבים של הארץ הקשר הישיר בין פנים

בתים חד-משפחתיים

טיפוס בנייה זה הוא עתיר שטח (מבנה בודד בתוך שטח פתוח רחב ידיים). פריסה על פני שטח רחב משפיעה השפעה רבה על עלות התשתית העירונית. מבנה מסוג זה בעייתי יחסית מבחינת בקרת האקלים הפנימי שבו, מכיוון שמעטפתו חשופה כולה לתנאי החוץ, אך הוא גם מאפשר שימוש מוגבר בשיטות לניצול אנרגיות חליפיות.

בתים חד-משפחתיים מאופיינים ביחס גדול בין שטח המעטפת לבין שטח הרצפה, בייחוד בהשוואה לצורות בנייה אחרות. זהו חסרון כאשר הבניין איננו מבודד היטב וכאשר בקרת אקלים הפנים שלו נעשית בשיטות קונבנציונליות. לעומת זאת, עצם חשיפתו של המבנה לכל הכיוונים מאפשרת ניצול מרבי של רוחות לאורור ולצינון בקיץ, ניצול הפוטנציאל הטמון בקירור בקרינה לילית וכן חשיפה מרבית לשמש חורפית לחימום. מימוש פוטנציאל זה תלוי בהבטחת נגישות שמש ורוח, במיקום הנכון של החללים במבנה, בהפניה נכונה של הפתחים לחדירת השמש והרוח, בבידוד ובהצללה. השטח הפתוח הפרטי שמסביב לבניין מאפשר את פעילות הדיירים בחוץ בשעות שונות של היממה ובעונות השונות של השנה, זאת תוך ניצול של התכונות הייחודיות של כל אזור ואזור. מבחינה אקלימית טיפוס זה של בנייה מותאם הן לאקלים חם ולח (טרופי) שבו דרוש אוורור מרבי בכל שעות היממה והמרווחים הגדולים בין הבניינים מאפשרים זרימת אוויר נוחה, והן לאזורים חמים שבהם יש רוחות יבשות המאפשרות קירור על ידי אוורור סלקטיבי. במקרה השני דרושה הצללה מרבית של מעטפת הבניין בשעות היום תוך שמירה על זרימה חופשית של אוויר.

למבנן המושתת על בתים חד-משפחתיים מספר חסרונות. התנוחה היא עתירת קרקע, הצפיפות המרבית שניתן להגיע אליה היא כ-2.5 יחידות לדונם נטו. היא דורשת פיתוח מערכות תשתית ארוכות וקשה לעצב בעזרתה חללים ציבוריים בעלי אופי עירוני. הגנת האדם ברחוב מפני רוחות, גשם ושמש קשה במיוחד בהעדר דפנות בנויות. ניתן לשפר אפיונים אלו על ידי ויתור על הפרטיות המוחלטת ושימוש בבניית שטיח נמוכה וצפופה. תנוחה זו מבוססת על יחידות חד-משפחתיות צמודות קרקע (לעתים בנות מספר



איור 15.5. "BedZED" – פרוייקט בלונדון שמשלב מגורים ומשרדים, חימום וקירור פסיביים, גגות ירוקים, מחזור שפחים, הפקת חשמל מתאים פוטו-וולטאים ועוד.

מבנים טוריים מתחלקים לשתי תת-קבוצות עיקריות: יחידות חד-משפחתיות צמודות (terrace housing) ובתי דירות. תת-הקבוצה הראשונה מורכבת מיחידות בנות מפלס אחד או יותר, בעלות קירות משותפים (הגמלונים בדרך כלל), והן יוצרות חזית רציפה. תנוחה זו מאפשרת את ניצול קרינת השמש לחימום היחידות (בתנאי שציר האורך של היחידה הוא מזרח-מערב) ועשויה להיות עדיפה מבחינת אורור. רציפות מסת הבנייה עשויה להגן על השטחים הפתוחים מפני רוחות בתנאי שתכנון המבנן מתייחס לכיווני הרוחות באתר. יתרון נוסף של תת-הקבוצה של טיפוס זה הוא הקשר של כל יחידה עם הקרקע, תוך יצירת חצר פרטית. היחידות עשויות לשלב גם מרפסות בכוונים שונים, וכן אורור נוח ויעיל יותר תוך ניצול היות כל יחידה בעלת מספר מפלסים ושני כווני אוויר.

תת-הקבוצה השנייה כוללת בניינים מסוג "הבלוקים" או "השיכונים" למיניהם, המוכרים היטב מנופי הארץ העירוניים של המאה הקודמת. בעבר היה מקובל בארץ להרים מבנים אלה על קומת עמודים פתוחה, מה שהגדיל את שטח המעטפת החשוף לתנאי חוץ, אך גם איפשר זרימת אוויר נוחה יותר דרך המרחב המבונה. במקרים מסוימים עלולה קומת העמודים לסבול ממהירויות רוח גבוהות יחסית לסביבה הפתוחה (אפקט ברנולי) ועל כן השהייה בחלל זה עלולה להיות לא נעימה. בשנים האחרונות ישנה הערכה מחדש של שיטת בנייה זו על

הבית לשטחי החוץ מוסיף רבות לאיכות החיים, אם השטחים החיצוניים מטופלים מבחינה אקלימית (הצללה, הגנה מפני רוחות וכו'). באזורים אלה תנאי החוץ בשעות הבוקר ולפנות הערב בקיץ ובעונות המעבר הם מצוינים לשיבה ולפעילות חוץ. חשיבות עקרון הקשר אל הקרקע מודגש במספר מחקרים שבהם מובאות הוכחות שונות על פגיעות הנגרמות בגלל שהייה ממושכת בקומות גבוהות (פגיעות נפשיות, תפקוד חברתי לקוי, התפתחות מוטורית איטית אצל תינוקות וכדומה).^[64]

המלצה: בתים חד-משפחתיים דורשים תכנון אקלימי נכון משום ששטחי מעטפת חשופים הגדולים יחסית. ניתן למצות את הפוטנציאל של בניינים אלה לניצול השמש (קליטת קרינה לחימום) והרוח (אורור מפולש ואחר לקירור) לצורך בקרת אקלים הפנים. ניתן לאפשר פעילות בשטחים פתוחים בהפניות שונות (חצר דרומית לחורף, חצר צפונית לשעות מסוימות בקיץ). בנייה נמוכה וצפופה מתאימה לאקלים המדבר יותר מאשר בניית יחידות חד-משפחתיות; היא מאפשרת יצירת חללים פתוחים מוגנים, מקטינה הפסדי אנרגיה דרך מעטפת המבנים ומצמצמת את ההשקעה בתשתית ופיתוח. מומלץ להעדיף את הבנייה הנמוכה והצפופה על פני בנייה של יחידות חד-משפחתיות עצמאיות, זאת תוך הבטחת אורור יעיל של המרחב המבונה.

מבנים טוריים

מבנים טוריים בעלי שלוש או ארבע קומות הם היעילים ביותר מבחינת עלות הבנייה ואחזקת מערכות יחסית לשטח הבנייה (עלות בנייה ואחזקה לכל מטר רבוע של בנייה).^[65] גובה זה הוא גם המרבי המאפשר תפקוד יעיל של מערכות סולריות שונות, כמו מערכות מרכזיות לחימום מים.^[66] הצמדת מספר יחידות למבנה טורי אחד מקטינה את שטח המעטפת הכללי החשוף לחוץ, ובעקבותיה קטנים מעברי החום דרך המעטפת. טיפוס בניין זה עשוי לשמש גם לבנייה נמוכה יותר וצפופה יחסית כגון קוטג'ים טוריים (טיפוס מקובל בארצות רבות), אך גם לבנייה גבוהה וצפופה יותר כגון מבנים טוריים בעלי חמש עד שמונה קומות (זאת בתוספת מעליות).

64. Lynch and Hack, 1985: 201-202

65. Kivisto et al., 1980

66. Kut and Hare, 1979



איור 15.6. בניין טורי לאורך רחוב מזרחי או מערביים יכול עדיין להפנות פתחים לדרום ולצפון לשם קליטת קרינה חורפית ואוורור קיצי. בתמונה בניין מגורים טורי בעל חלונות עליים דרומיים, הגדה הדרומית של האי, אמסטרדם (צילום: יצחק מאיר).

טיפול נכון בכדי למנוע הפיכתן לגמלונים אטומים. פירוט נכון של חזיתות אלה עשוי לייצר בהן פתחים הפונים לכיוון השמש והרוח, מרפסות הנוצרות על ידי גריעה ממסת החזית ופונות דרום מזרחה ודרום מערבה, ועוד פתרונות העשויים להפוך את יחידות הקצה לבעלות פוטנציאל תכנוני ואנרגטי גבוהים מהטיפוסי לבניין כזה.

המלצה: לדירות במבנים הטוריים תהיה חזית דרומית וחזית צפונית. הבניינים ימוקמו בשולי המבנן או השכונה, בכיוון ממנו מגיעות הרוחות הבעייתיות והסופות. יש לפצות את היחידות הקיצוניות במבנים על הפסדי אנרגיה עקב מיקומם בגמלונים. ברוב המקרים יש להימנע מקומת עמודים פתוחה. קצוות מזרחיים ומערביים של בניינים טוריים, או בניינים טוריים בעלי פנות לא מיטבית צריכים ליצר חזיתות או חלקי חזיתות הפונים לשמש ולרוח.

קומת עמודים פתוחה, בעיקר בשל פגיעותו הבניין במקרה של רעידות אדמה. לחילופין, שילוב של שטחי מבואה, אחסון ומעברים חצי-ציבוריים מקורים עשוי להפוך טיפוס בניין זה מועמד מועדף לבניית מגורים על קו בניין 0.

ניתן להגיע לניצול יעיל של קרינת שמש ורוחות, כאשר החזיתות הארוכות של הבניינים פונות לדרום לצפון, ולכל דירה יש חזית דרומית וחזית צפונית. דגם זה אפשרי בתכנית שבה כל זוג דירות מוזן על ידי חדר מדרגות, או כאשר הכניסה לשורת דירות בכל קומה היא דרך מסדרון פתוח לחוץ ("רחוב עילי"). המקרה הראשון עלול להיחשב לבזבזני מבחינת עלות חדר המדרגות (והמעלית במקרה של ארבע קומות ויותר) ליחידת דיור, ואילו המקרה השני, שהיה נפוץ בבנייה הציבורית של אמצע המאה ה-20, נחשב לבעייתי בשל פגיעה בפרטיותם של חללי הדירות הפונים לאותו מסדרון פתוח. לעומת מגבלותיהן של תכניות אלה, כל תכנית אחרת תיצור בעיות נגישות שמש או רוח. דגם בעל שורה אחת של דירות עם כניסות דרך מסדרון סגור יגרום בדרך כלל לחוסר אוורור מפולש או חוסר פרטיות במקרה של פתיחת הדירות למסדרות הסגור. הוא עלול גם לסבול מתאורה לקויה בדירות. תכנית בעלת מסדרון אמצעי המזין שתי דירות משני צדדיו (סכימה לא שכיחה בארץ אך נפוצה בארצות אחרות) תיצור שורה אחת של דירות ללא נגישות שמש חורפית, ושתי השורות תסבולנה מאוורור לקוי.

יתרוננו העיקרי של טיפוס בניין זה טמון בצמצום שטחי המעטפת החשופים לתנאי חוץ, למעט היחידות הקיצוניות. ככל שגובה המבנה יגדל – בהתייחס למספר המפלסים או הקומות – אורך צלו יגדל ביחס של 1:2, על כן יש לתת את הדעת מבחינת מיקום השטחים הפתוחים ביחס ליחידות הדיור, כך שלא יפגע פוטנציאל השימוש בהם בחורף. מבנים אלה עשויים לשמש מחסום רוח ועל כן מיקומם ביחס לבניו נמוך יותר צריך להתייחס לכיווני הרוחות. יחד עם זאת, במקרה כזה יש להתייחס בהתאם לתכנון היחידות בתוך המבנים, וכן לפרטי האיטום בצדם הפונה לרוח.

אחד החסרונות המרכזיים במיקום מבנים טוריים במסגרת מבנן עירוני היא הבעייתיות של החזיתות המערבית והמזרחית של המבנן. חזיתות אלה דורשות



מבנים רבי-קומות

מבנים רבי-קומות הם דגם בנייה בעייתי ממספר בחינות. בקרת האקלים בפנים המבנה קשה, במיוחד ביחידות הגבוהות, והמיקרו-אקלים הנוצר בסביבתו הקרובה ולמרגלותיו עלול להיות לא נוח. עלות המבנה על מערכתיו השונות (כולל מעליות, משאבות וכו') גבוהה מזו של מבנים טוריים בעלי שלוש עד ארבע קומות. עלות אחזקתן של המערכות השונות אף היא גבוהה יחסית לדגמי בנייה אחרים. אף על פי כן, דגם אינטנסיבי של הקרקע (ניצול זה דורש התייחסות מיוחדת לזכויות שמש).

בניין רב קומות מורכב בדרך כלל מפיר תנועה אנכית המשרת לעתים גם מערכות (מעליות, מדרגות, וצנרת למיניה) וסביבו מספר יחידות (דיור או אחרות), המסודרות על פי רוב באופן סימטרי בכל קומה. דרישה לפתיחה לשמש ולרוח מגבילה את אפשרויות ארגונה של התכנית. צורת המבנה יוצרת כמה בעיות אקלימיות הן בתוכו והן מסביבו. איבוד האנרגיה דרך המעטפת (באמצעות הולכה והסעה) הוא רב, משום שמהירות הרוח גדלה עם הגובה מפני הקרקע (או ממפלס הגגות הממוצע בסביבה) כך שהלחצים המופעלים על ידיה על הקירות ובמיוחד על החלונות גדלים אף הם עם הגובה. לחצים אלה גורמים החלפות אוויר מהירות ליד משטחי הבניין המגבירות את הפסדי החום בהולכה דרך המעטפת ובהסעה ממנה על ידי הרוח, וגם חדירה מוגברת של אוויר אל תוך המבנה, בצד הרוח, או שאיבה ממנו דרך פתחים וסדקים בצלה של הרוח. תופעה זו עלולה להיות חמורה ומפריעה במיוחד באזורים גבוהים בהם מהירויות הרוח גבוהות ממילא, וכן באזורים מדבריים בהם ישנה ממילא בעיה של סופות אבק. בעיה נוספת הנה יצירת זרמי אוויר חזקים סביב המבנה, עובדה הגורמת לאי-נוחות במיוחד למרגלות הבניין הגבוה. לעתים קרובות תופעות אלה מחייבות שימוש במערכות יקרות לבקרת האקלים. שילובן של מערכות סולריות מרכזיות לחימום מים בבניינים רבי-קומות בעייתי אף הוא, מאחר שקווי ההספקה הארוכים מצריכים התקנת משאבות וגורמים לאיבוד חום משמעותי.

ריכוז וציפוף של מבנים רבי-קומות (למשל על ידי הצמדתם בקירות הגמלון כמקובל בערים גדולות

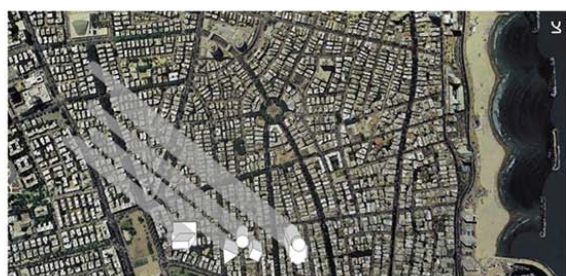
הדמייה של צל ע"י מגדלים על מרכז תל אביב, לאורך היום הקצר בשנה, ה-21 לדצמבר.



8:00 AM



12:00 PM



15:00 PM

מגדל משה אביב
מגדלי עזריאלי
מגדל כלב שלום

מגדל שלום מאיר: 34 קומות, 142 מ'
מגדלי עזריאלי (עגול): 49 קומות, 187 מ'
מגדל משה אביב: 68 קומות, 244 מ'

איור 15.7. אורך הצל המוטל על ידי בניינים גבוהים נבחרים בבוקר, צהריים ואחה"צ ביום חורף בתל אביב.

בעולם) מאפשר ניצול אינטנסיבי יותר של הקרקע אך במחיר של החמרת התנאים בשטחים הפתוחים הסמוכים (על ידי הצללת יתר, חסימת הרוח או יצירת זרמי אוויר חזקים במיוחד) וכן על ידי יצירת עומס רב יותר על תשתיות (מים וביוב, דרכים וחניה). דרישה להבטחת נגישות שמש במרקם של בנייה גבוהה תגרום לפיזור הבניינים על פני שטחים נרחבים בשל הגידול של שטח מעטפת הצל המוטל על ידי בניין ביחס לגובהו. אם אכן שיקולים ביו-אקלימיים מהווים חלק מהפרוגרמה התכנונית, אזי אלה יגרמו לאיבוד היתרון היחסי של טיפוס בניין זה, הלא היא הצפיפות הגבוהה. פיזורם של בניינים אלה בתוך שטחים פתוחים נרחבים באזורים עירוניים מקטין בסופו של



דבר את הצפיפות העירונית, ויוצר סביבה שאיננה נוחה להולכי רגל. באזורים מדבריים פיזור זה יוצר בעיות סביבתיות חמורות במיוחד, כגון השארת שטחים לא מוגנים מבחינה אקלימית, הדורשים השקעה רבה בהשקיה ואחזקה כדי למנוע את הפיכתם למקור אבק וחול.

מחקרים רבים מעידים על קשר ישיר בין גובה המגורים לבין בעיות פסיכולוגיות וחברתיות שונות, ביניהן התפתחות מוטורית איטית של ילדים אשר נמנע מהם לשהות מחוץ לבניין בשל אי-יכולת המבוגרים לפקח עליהם; מועקה וניכור בעיקר בקרב קבוצות גיל או מגדר המבלות שעות רבות בתוך המגורים – נשים, קשישים, ילדים קטנים; התפוררות קשרים חברתיים; שיעור גבוה של תופעות פשיעה יחסית לתופעות מקבילות בבניינים נמוכים יותר.^[68,67] מחקרים

אחרים מעידים כי בנייני משרדים רבי-קומות יוצרים הרגשת אי-נוחות בקרב מבקרים, גורמים לניכור בין הקהל לבין העובדים, ובין העובדים לבין עצמם. גורמים אלה אינם משפיעים ישירות על צריכת האנרגיה – לפחות לא במובן הצר. למרות זאת, ניתן לראות בתופעות אלה ובטיפול בהן מרכיב בעל חשיבות בצריכת משאבים שונים, כגון כוח אדם ושעות עבודה, השקעה באחזקת בניינים בבעלות ציבורית ועוד.

מקרה טיפוסי של בניינים גבוהים הנו זה של בניינים בעלי תכנית H – ארבע דירות סימטריות בכל קומה. בפרויקט שתוכנן על ידי היחידה לאדריכלות מדברית



עבור משהב"ש – **תכנית מתאר מפורטת** לרמות ג', פלח D, בבאר שבע, ניסיון לעצב בניינים כאלה נעשה כך שתשמרנה זכויות השמש והרוח של כל יחידה, וכך שבניין אחד לא יחסום את שכניו.

המלצה: בדרך כלל יש להימנע מבנייה לגובה גדול מ-6-8 קומות. כאשר קיימת דרישה מפורשת לבנייה מסוג זה יש להקפיד על הפניה מתאימה של היחידות השונות, בידוד ואיטום משופר של מעטפת הבניין ואיטום טוב של הפתחים. דרוש חישוב של מעטפות ההצללה להבטחת נגישות שמש למבנים ושטחיים פתוחים סמוכים מחד גיסא, אך למזעור השטח הפתוח מאידך גיסא.



67. Alexander et al., 1977: 114-119, 468-476

68. Newman, 1973



צילום: וולפג מוצפי-האלר

...בהתאם לתנאי האקלים האזורי וכחלק ממקבץ הבניינים יש לשלב שיקולי אנרגיה וסביבה בתכנון הבניין הבודד...

16. בנין מודע אקלים

כיצד בניין יכול לספק נוחות תרמית הולמת תוך חסכון מרבי באנרגיה?

* * *

צריכת אנרגיה ונוחות תרמית עומדות, כביכול, בשני צידי המשוואה: נדרשת הראשונה כדי ליצור את השניה. שיפור אמיתי בתפקוד הבניין, אם כך, מותנה ביעילותו – ובעיקר בהגברת היעילות של המנגנונים המתווכים בין החלל הפנימי לבין הסביבה הטבעית.

בעולם הטבעי, כל גוף חי שואף לאיזון תרמי עם סביבתו. צמחים ובעלי חיים עוברים תהליך הסתגלות מתמיד כדי להתאים את עצמם לתנאי האקלים ולשפר את סיכויי הישרדותם. הסתגלות זו בא לידי ביטוי בשלושה מנגנונים, אשר יוצרים התאמה של (1) מיקום הגוף במרחב, (2) צורתו הפיזית, ו-(3) מערכת חילוף החומרים והאנרגיה שפועלת בתוכו.

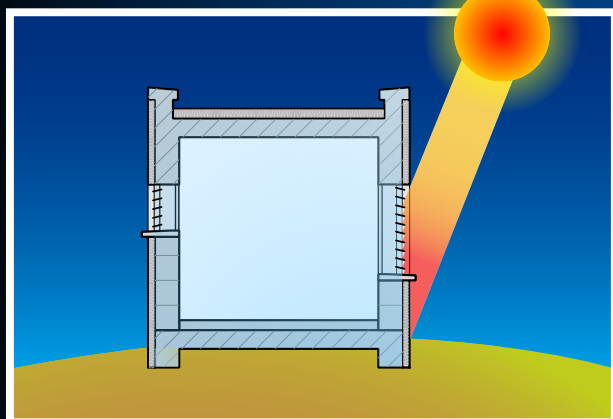
הפועלים בטבע: ניתן להתאים את מיקום המבנה ואת פנותו לסביבה, ניתן להתאים את צורתה של מעטפת הבניין ואת החומרים שמהם היא עשויה, ואפשר לנצל גם מערכות חימום וקירור מכאניות. אך בבניין מודרני אופייני, האמצעי העיקרי – ולעיתים היחיד – ליצירת נוחות תרמית הוא מיזוג האוויר המכני, וכל שאר האמצעים האפשריים פשוט נזנחים.^[69]

המחיר של מגמה זו נמדד בצריכת האנרגיה ובתופעות הסביבתיות הנלוות אליה: צריכה מוגברת של משאבים מתכלים, זיהום אוויר, והגדלת פליטת גזי חממה. בישראל כמו במדינות מפותחות אחרות, הפעלה של בניינים אחראית לחלק ניכר (כ-40%) מצריכת האנרגיה הכללית, והחלק הגדול מצריכה זו מושקע במערכות חימום וקירור לשם יצירת נוחות תרמית. כאשר האנרגיה המושקעת במבנים (כולל תהליך הייצור של חומרי בנין, ותהליך הבניה עצמו) נלקח בחשבון, מתברר כי בניינים אחראים למחצית או יותר מכל האנרגיה הנצרכת בשוק.

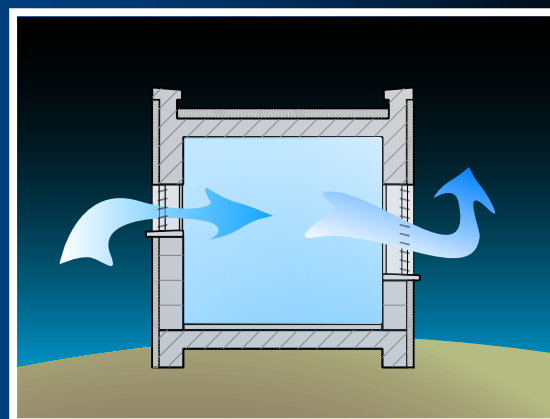
המנגנון הראשון – מיקום – מתבטא למשל בהבדלים הבולטים בין הכיסוי הצמחי במדרון דרומי לעומת זה שבמדרון צפוני, או בדגם ההתנהגות של חרדון, שחושף את עצמו לשמש מלאה בשעות הבוקר הקרות אבל מתמקם בצל בשעות החמות. התנהגות מודעת אקלים מתגלה גם דרך המנגנון השני – אצל חיות אשר מסוגלות לשנות את צורת גופן, כגון הנחש שמשטח את גופו בניצב לשמש כדי לקלוט קרינה, וחוזר לצורה גלילית כאשר ההתחממות לא רצויה. תגובות מהסוג הזה בולטות אצל בעלי דם-קר, אשר מוגבלים ביכולתם לווסת את חום הגוף באמצעות חילוף החומרים – המנגנון השלישי. אך גם בעלי דם-חם נעזרים בתכונות הפיזיות של גופם כדי לשמור על החום, כדוגמת הנוצות של ציפורים או הפרווה של יונקים, אשר מעניקים שכבת בידוד תרמי יעילה.

מעבר לוויסות היעיל של טמפרטורת גופם ע"י מנגנונים פיזיולוגיים וע"י בגדים, בני אדם מסוגלים לשפר את תנאי מחייתם באמצעותם בנייניהם. בניסיון לספק תנאים תרמיים נוחים למשתמשים בבניין, עומדים לרשות המתכנן אמצעים אשר מקבילים למנגנונים

69. Knowles, 1974

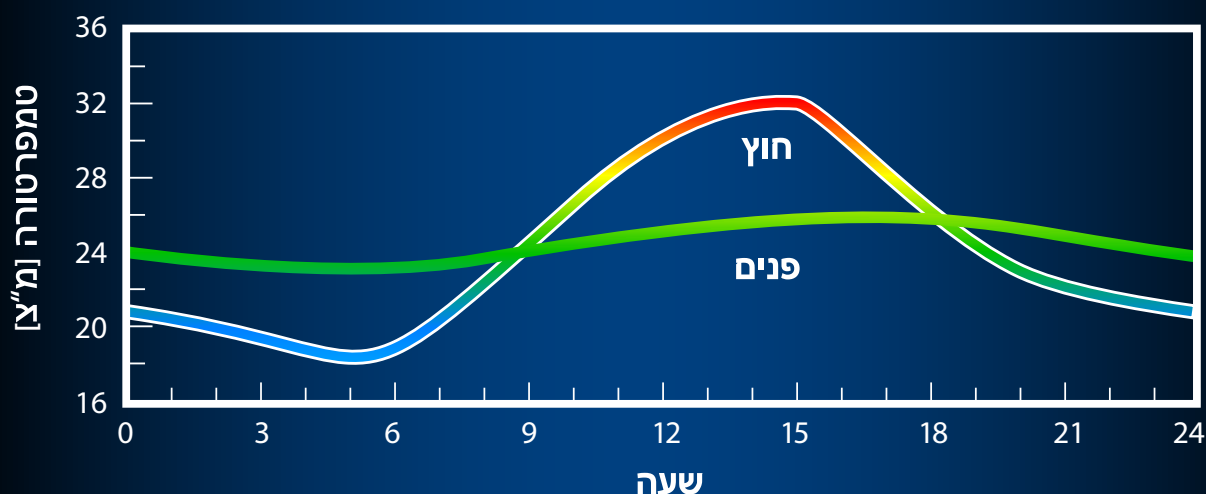


קיץ - יום



קיץ - לילה

→ דרום

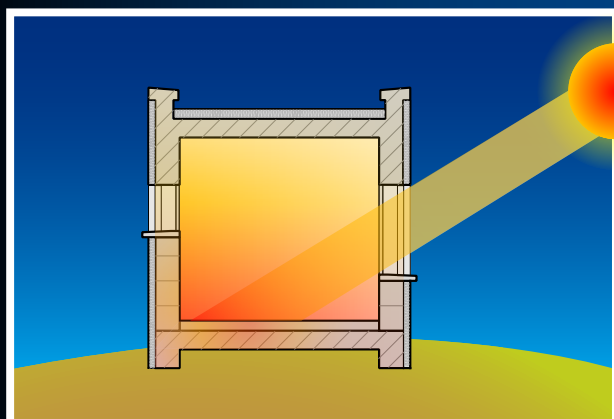
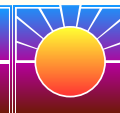


איור 16.1. תפקוד עקרוני של בנים פאסיבי במחזור יומי באקלים חם ויבש (אזור רמת הנגב) בעונת הקיץ. בשעות היום יש הגנה מרבית בפני קרינת השמש, באמצעות בידוד חצוני והצללת פתחים. בלילה המסה הפנימית מקוררת בעזרת אוורור מפולש, ונוצר מהלך טמפרטורה יציב ונוח.

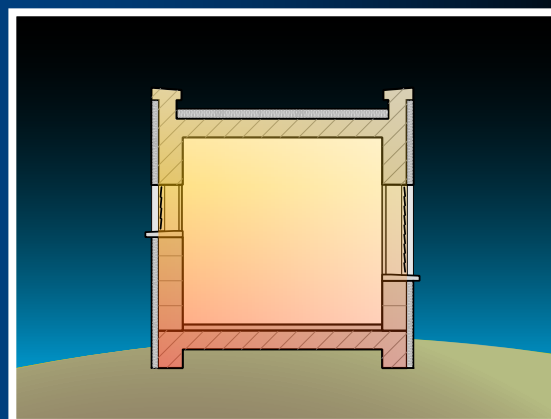
הבניה וההקשר הטבעי, וכאשר נקבעים הארגון הכללי של המבנה וצורתו בהתאם לפרוגרמה.

מידת השיפור ביעילות האנרגטית של הבניין תלויה בהבנת האקלים המקומי, ובהתייחסות להזדמנויות ומגבלות שקיימות בסביבה. על כן יש צורך בניתוח יסודי של האקלים המקומי, כולל מיפוי של התנאים העונתיים האופייניים (טמפרטורת אוויר, לחות יחסית, זוויות ועוצמות של קרינת שמש, משטר רוחות) ושל התנאים באתר עצמו (טופוגרפיה והפניית מדרונות, מבנים שכנים אשר מטילים צל באתר או דורשים נגישות שמש, מכשולים לזרימת אוויר, וכו').

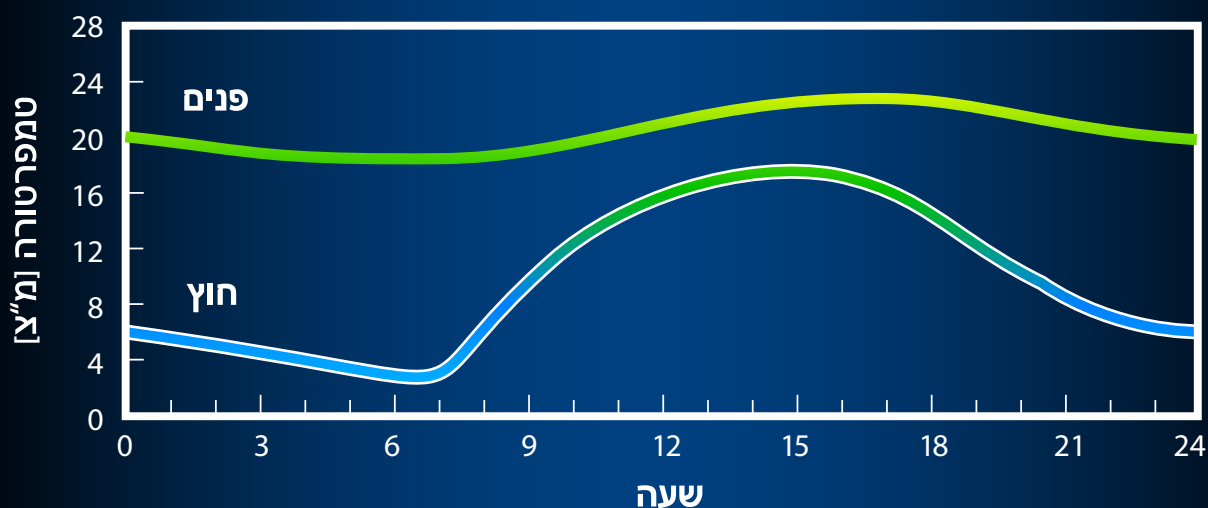
בשנים האחרונות חל שיפור מהותי ביעילות האנרגטית של מערכות מכניות ושל מוצרים מתקדמים. אך הפוטנציאל העיקרי להקטנת הצריכה של אנרגיה במבנים עדיין טמון בתכנון הבניין עצמו – משום שהתכונות של מעטפת הבניין קובעות במידה רבה את העומסים התרמיים שמוטלים על החלל המאוכלס. יתר על כן, התפקוד התרמי של הבניין אינו תלוי רק ברמת המוצרים וחומרי הגמר, אשר בדרך כלל מפורטים לקראת סוף תהליך התכנון. התפקוד הסופי תלוי גם בתכונות שנקבעות בשלבים הראשוניים של התכנון, כאשר נקבעים המיקום של המבנה יחסית לסביבה



חורף - יום

→
דרום

חורף - לילה



איור 16.2. תפקוד עקרוני של בניין פסיבי במחזור יומי באקלים מדברי (אזור רמת הנגב) בעונת החורף. בשעות היום יש קליטה ישירה של קרינת שמש דרך פתחים מזוגים דרומיים, ורוב האנרגיה נאגרת כחום במסה התרמית הפנימית. בלילה החום נשמר בעזרת בידוד חצוני, ונוצר מהלך טמפרטורה יציב ונוח.

**ראה תפקוד
של בניין פאסיבי
בהדמיה התרמית**

המלצה: יש לשלב ניתוחים אקלימיים ואנרגטיים לא רק בשלבי התכנון המתקדמים או במפרטים הטכניים, אלא בשלבים הראשוניים של התכנון האדריכלי. על סמך ניתוחים אלה, יש להגדיל את יעילות המבנה על ידי התאמה אקלימית של מיקום המבנה באתר ובתוך **מקבץ הבניינים**, של **צורת המעטפת**, ושל **החומרים** שמרכיבים את הבניין.



היחס S/V עבור כיפה (חצי כדור) נמוך מזה של קובייה, ואותו ערך עבור קובייה נמוך מזה של מעטפת מלבנית מוארכת בתכנית (מידות אורך ורוחב שונות) או בחתך (מידות רוחב וגובה שונות). ניתן להבחין שהיחס גם מושפע מה"רגולאריות" של המעטפת: הוא גדל ככל שהצורה הבסיסית מפורקת לתת-צורות קטנות. בפועל, אם כך, הקומפקטיות קשורה גם לגודל המעטפת: משום ששטח הפנים גדל כפונקציה ריבועית (בחזקה שנייה) של המידות, והנפח גדל יחסית למידה בחזקה שלישית, הרי כל הגדלה במידות תביא לכך שהנפח עולה יחסית לשטח הפנים – דהיינו, S/V הולך וקטן אם הגודל.

יש לציין שהערכת הקומפקטיות של המעטפת עשויה להשתנות כאשר מודדים את שטח הפנים יחסית לחלל "שימושי" – כפי שמתבטא בשטח הרצפה – במקום ליחידת נפח כללי. כך, למשל, לבניין בעל תקרה גבוהה (כדוגמת הכיפה באיור 17.1) יש יחס S/V נמוך, אבל שטח הפנים שלו יחסית לשטח הרצפה גבוהה מאוד לאומת קובייה שמחולקת למספר קומות. לכן הקומפקטיות המעשית של המעטפת קשורה לא רק לצורתה החיצונית, אלא גם לחלוקתה הפנימית.

...התפקוד התרמי של בניין מודע אקלים, וכמו כן הצורך באנרגיה לחימום וקירור, תלויים במידה רבה בתכנון הצורני הבסיסי של המעטפת...

17. צורת המעטפת

מעטפת הבניין מווסתת את מעבר החום בין החלל הפנימי והסביבה החיצונית, ולצורתה יש השלכות שונות על העברת האנרגיה בהולכה, בהסעה ובקרינה. איך ניתן לעצב את המעטפת בצורה שממזערת מעבר חום שאינו רצוי, ובו זמנית מאפשרת מעבר אנרגיה שתורמת לתפקוד הבניין?

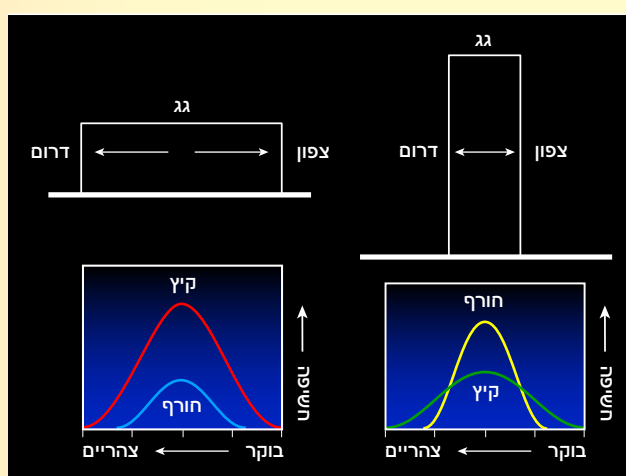
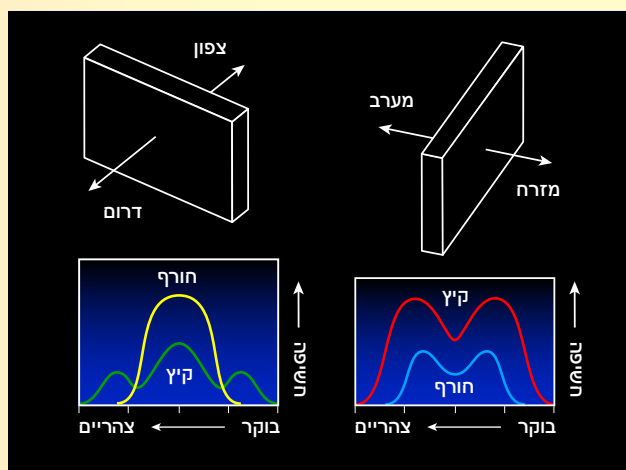
* * *

צורה קומפקטית

רבים המקרים שבהם הטמפרטורה מחוץ לבניין מתרחקת מזו שרצויה בפנים, וניכרת החשיבות של הולכת חום דרך הקירות והתקרות: איבודי חום בתנאי חורף קרים, ועומסי חום בתנאי קיץ חמים. שעור מעבר החום **בהולכה** תלוי בשלושה גורמים: הפרש הטמפרטורה בין שני צדי הקיר (או כל מרכיב אחר של המעטפת), המוליכות התרמית שלו (בהתאם לתכונות החומרים), וגודל פני השטח שלו.

משמעותו של הגורם השלישי – דהיינו, גודל השטח החשוף לתנאי החוץ – היא שכל הגדלה במעטפת מגדילה ביחס ישיר את מעבר החום דרכה. משום שהעברת חום בלתי מבוקרת בדרך כלל פוגעת בנוחות התרמית, או מגבירה את צריכת האנרגיה לחימום וקירור, יש יתרון עקרוני למעטפת קומפקטית – אשר שטח הפנים שלה קטן יחסית לנפח של הבניין.

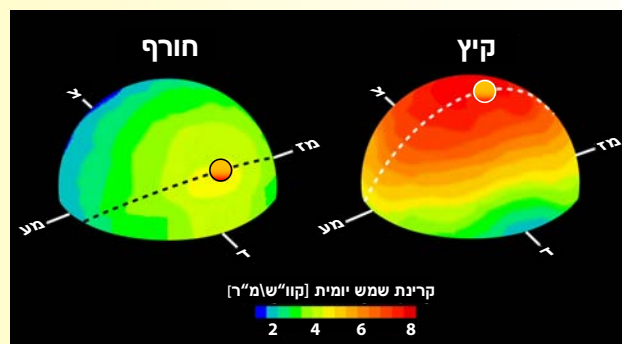
רמת הקומפקטיות של המעטפת תלויה במספר גורמים גיאומטריים. היחס בין שטח הפנים ונפח הבניין (S/V) הולך וקטן ככל שהמימדים שלו יותר אחידים – כך שהצורה הקומפקטית ביותר היא למעשה כדור, בעל מידות זהות בכל הכיוונים. כפי שהוצג באיור 17.1,



איור 17.3. השפעת הפרופורציות של המעטפת בתכנית (למעלה) ובחתך (למטה) על החשיפה לקרינת שמש בעונת הקיץ ועונת החורף.

בדומה לקרינת שמש ישירה, שמתאפיין בכיווניות ברורה בהתאם לזמן ולמיקום, ניתן להתחשב בכיווניות של רוחות בתצורת המעטפת. לרוח חזקה יכולה להיות השפעה ניכרת על סילוק חום מפני המעטפת בהסעה (ככל שהאוויר בחוץ קריר יותר מהם) – אשר גורמת להתקררות לא רצויה בחורף וקירור רצוי בקיץ. קירור פסיבי באמצעות אוורור מפולש מתבסס על הפניית הפתחים במעטפת: פתחי כניסה בכיוון הרוח ופתחי יציאה בכיוונים נגדיים. למרות שכיווני הרוח משתנים באזורי אקלים שונים בארץ, ברוב האזורים בחודשי הקיץ ישנן רוחות סדירות מהצפון, צפון-מערב ומערב.

חשוב לציין שהשפעות הקרינה והרוח, גם אם הן ניכרות במישור החיצוני של המעטפת, גורמות למעבר חום דרך הקירות והתקרות רק בהתאם לתכונות התרמיות של אותם משטחים. ככל שהם מבודדים יותר, כך קטנות ההשפעות התרמיות של צורת

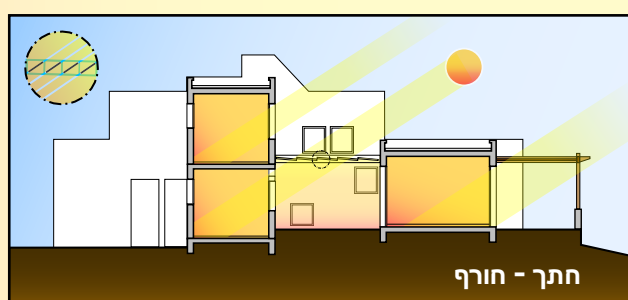
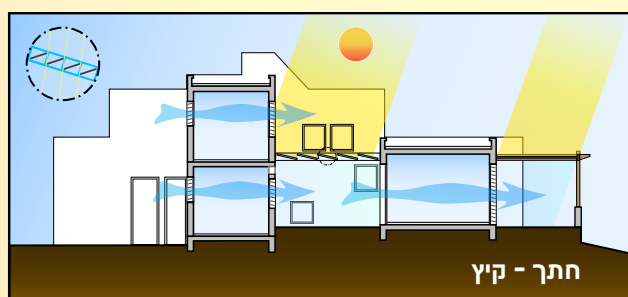
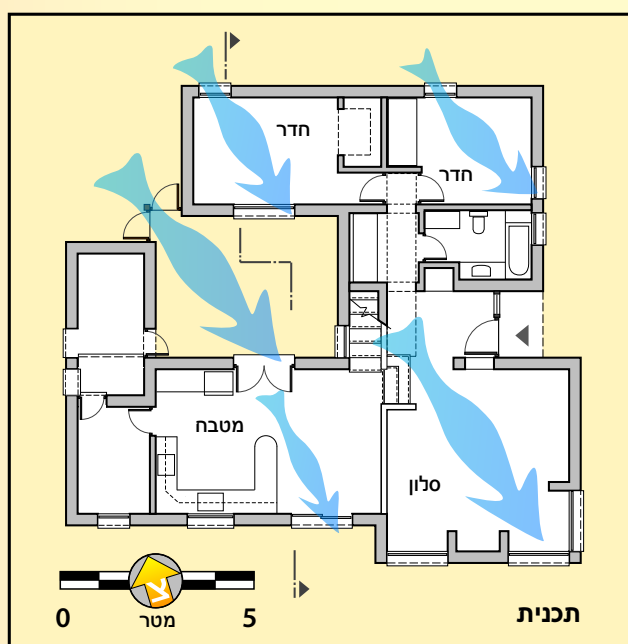


איור 17.2. עוצמתה של קרינת השמש בכיוונים ושיפועים שונים, ביום קיץ (21 יוני) ויום חורף (21 דצמבר) בנגב. מסומן גם מסלול השמש בכל אחת מהעונות.

צורה סלקטיבית

ישנה השפעה נוספת של תצורת המעטפת, שקשורה גם היא להולכה. כאמור, שיעור מעבר החום דרך המעטפת תלוי בהפרש הטמפרטורה בין שני צדי הקיר. הטמפרטורה של פני השטח החיצוניים מושפעת לא רק מזו של האוויר החיצוני, אלא גם מחשיפתם לקרינת שמש (ובמידה מסוימת גם לרוח) – כאשר עוצמת החשיפה בכל נקודת זמן תלויה בהפניה של הקיר. לכן, התחממות והתקררות הבניין קשורות ליחס בין שטחי הקירות בהפניות שונות, וגם ליחס בין שטחי הקירות והגגות. השפעות אלה מודגשות כמובן ככל שיש במשטחים אלה פתחים מזוגגים גדולים, שדרכם אנרגיה עוברת ישירות בקרינה ובהסעה.

התחממות המעטפת כתוצאה מחשיפתה לקרינת שמש מהווה, באופן כללי, יתרון בעונת החורף וחסרון בעונת הקיץ. ממבט על מסלול השמש בכל עונה (איור 17.2), ומתוך הבנה בסיסית של גיאומטריה סולרית, ניתן להבחין כי הפנייה דרומית מספקת "רווח" קרינתי בחורף והפנייה מערבית או מזרחית גורמת ל"נזק" קרינתי בקיץ. במעטפת מוארכת, אם כך, ישנו יתרון מובהק לציר אורך בכיוון מזרח-מערב (איור 17.3) – שמאפשר חזית דרומית גדולה ומצמצם את שטחם של החזיתות המופנות לכיוונים הניצבים. מעטפת בעלת ציר אורך מסובב ב-90 מעלות, לאומת זאת, "סובלת" מעודף קרינה בקיץ (מן המזרח בבוקר ומן המערב אחה"צ) ומחסור בקרינה בחורף (מן הדרום בצהריים). לעיתים ניתן לנצל גם את הפרופורציות בין משטחים אנכיים ואופקיים (איור 17.3) כדי להגדיל את החשיפה לדרום ולהקטין את שטח הגג, אשר חשוף בקיץ לעוצמת קרינה הגדולה ביותר.



איור 17.6. התכנון של בית באקלים מדברי מדגים את השאיפה ליצור מעטפת קומפקטית תוך שמירה על נגישות שמש ורוח בכל חלקי הבניין. החצר הפנימית ניתנת לסגירה בחורף ע"י קירוי שקוף, ובקיץ היא מוצלת ומאווררת.

* * *

התרומה האקלימית של צורת המעטפת, ובמיוחד של הפניית הקירות, מתבטאת בראש ובראשונה בפתחים מזוגים. בפועל היעילות האנרגטית של המעטפת תלויה בתכונות התרמיות של קירות רב-שכבתיים ושל גג מגן.

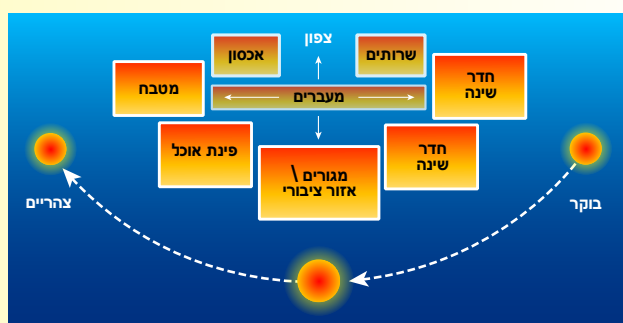


איור 17.4. החלון עילי דרומי מאפשר נגישות שמש חורפית לחלל בצד הצפוני של הבניין.

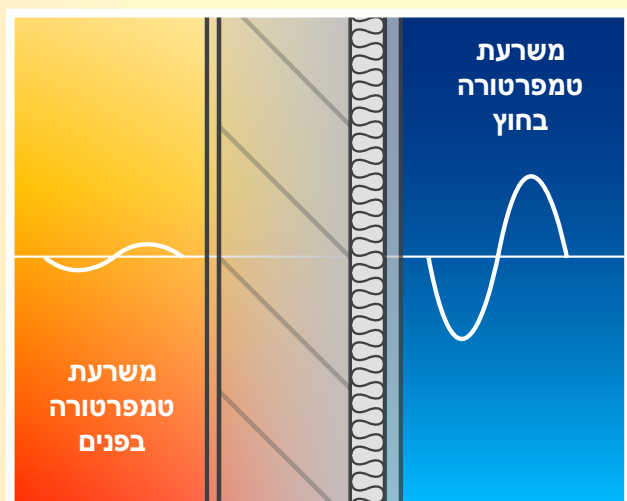
המעטפת כתוצאה מהולכה – אבל במידה שצורה זו מכתיבה את כיווני הפתחים, יש לה חשיבות בכל מקרה כתוצאה מהעברת אנרגיה בקרינה והסעה.

המלצה: מומלץ לצמצם את שטח המעטפת ככל שניתן, במיוחד באזורי אקלים קיצוניים כגון הערבה ואזורי ההרים, שבהם הפרשי טמפרטורה רחבים מטילים עומס תרמי כבד על הבניין. באותה מידה מומלץ להבטיח נגישות לשמש חורפית ולאורור מפולש בקיץ, בכל חלל פנימי מאוכלס. למעשה, שתי הדרישות האלה עלולות להיות מנוגדות – ולעיתים קרובות יש צורך בפתרונות תכנוניים מיוחדים שמאפשרים קומפקטיות וגם חשיפה בו זמנית. לדוגמא:

- חלון עילי שמאפשר חשיפה דרומית לחדר בצפון המבנה (איור 17.4).
- ארגון פנימי של הבניין שמכתיב חשיפה מועדפת לחללים בהתאם לאופן שימוש בהם: למשל אזורי מגורים בחזית דרומית ואזורי אחסון ושירותים בצד צפוני (איור 17.5).
- חלל ביניים (חצר פנימית, מרפסת מקורה, וכו') אשר מתווך בין פנים וחוץ ומווסת את חשיפת המעטפת בפועל בהתאם לעונה (איור 17.6).



איור 17.5. סכמת ארגון פנימי של בית שמתחשב בהפניית מועדפות מבחינת החשיפה לשמש.



איור 18.1. המטרה: למתן את תנודות הטמפרטורה במחזור היומי, וליצור תנאים יציבים ונוחים בתוך הבניין.

...בבנין מודע אקלים, שתוכנן תוך התחשבות במשמעויות האנרגטיות של צורת המעטפת וחומרי הבניין, יש תפקיד מרכזי לתכונות החומרים של הקירות החיצוניים.

18. קיר רב-שכבתי

בתנאי הארץ, הבניין נתון לעיתים קרובות לעומסים תרמיים משמעותיים אשר נובעים מתנאי חוץ לא נוחים – בעוד שקיימות תנודות טמפרטורה רחבות בין יום ולילה ובין עונה לעונה. מצבים דינמיים אלה מחייבים קירות המעטפת בעלי שתי

תכונות מנוגדות: מצד אחד, נדרש קיר בעל התנגדות תרמית גבוהה, כדי לסכל מעבר חום בלתי רצוי. מצד שני, על הקיר להיות בעל יכולת אגירה תרמית גבוהה, שתאפשר מיתון של התנודות וניצול של "אנרגיה טבעית" לחימום וקירור.

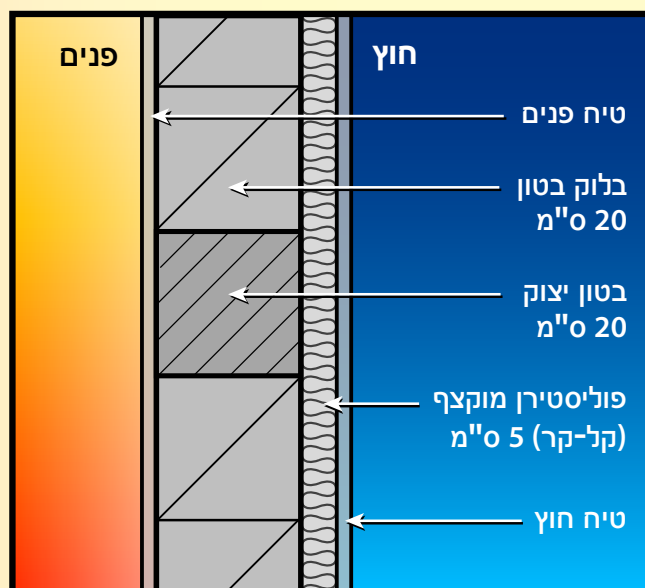
* * *

חומרים נפוצים לבניית קירות בארץ, כגון בטון ומוצרי, מתאפיינים במוליכות תרמית גבוהה יחסית (ראה טבלה 6.2 בפרק 6). מבלי לעבות את הקיר מעבר לטווח המקובל, ניתן להשיג שיפור משמעותי בהתנגדות שלו רק תוך שימוש בחומרי בידוד תרמי – דהיינו, חומרים בעלי מוליכות תרמית נמוכה, שמתאפיינים כחומרים "קלים" מבחינת המשקל הסגולי (הצפיפות) שלהם.

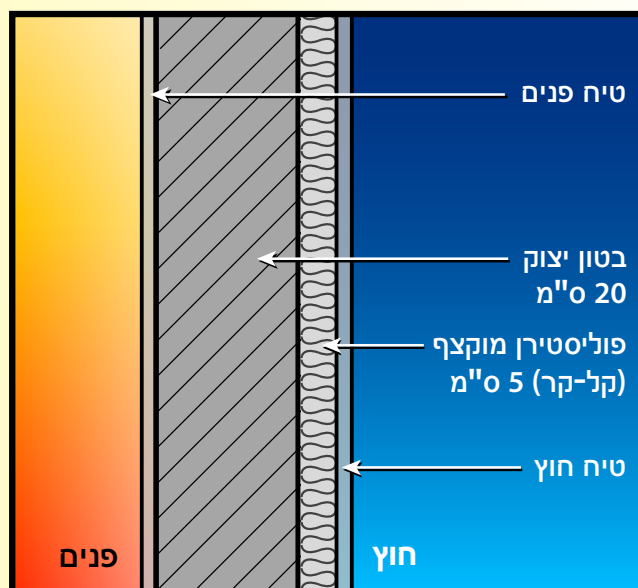
אולם בחלק גדול מאזורי הארץ, ובעיקר באלה שגבוהים וצחיחים יותר, האקלים מתאפיין במשרעת טמפרטורה גדולה במחזור היומי, ובמצב תרמי לא יציב. בחורף, למרות הטמפרטורות הנמוכות, ישנם ימים רבים בהירים וקרינת שמש בעוצמה גבוהה, ובקיץ הימים החמים מלווים בלילות קרירים ורוחות חזקות. כדי למתן את תנודות הטמפרטורה ולנצל בצורה מיטבית את מקורות האנרגיה הטמונים באקלים המקומי, נדרשת מהקיר "אינרציה תרמית" גבוהה, אשר תלויה באגירת חום לאורך זמן. סוג החומר שמעניק לקיר את יכולת האגירה נקרא "מסה תרמית" – דהיינו, חומר בעל קיבול חום גבוה, אשר מיושם בנפחים גדולים.

ברוב אזורי האקלים של הארץ, שוררים תנאים לא נוחים בפרקי זמן ניכרים במשך המחזור השנתי האופייני. בשעות היום של ימי הקיץ יש תנאים חמים למדי (טמפרטורות גבוהות וקרינת שמש חזקה, ובמישור החוף גם לחות גבוהה), ובשעות הלילה של החורף הטמפרטורות נמוכות (במיוחד באזורי ההרים). כאשר הטמפרטורה החיצונית של קיר נתון שונה בהרבה מזו שרצויה, מטעמי נוחות תרמית, בתוך הבניין, מוגבר מעבר אנרגיה דרך הקיר – מבפנים החוצה בתנאים קרים, ובכיוון הפוך בתנאים חמים.

ברוב המקרים הקירות מהווים חלק גדול ממעטפת הבניין, ומעבר החום המוגבר דרכם עלול להוות גורם עיקרי להתחממות או התקררות החלל. לכן, חסכון באנרגיה הנדרשת כדי לשמור על תנאי נוחות קשורה ישירות ליכולת הקיר להתנגד למעבר חום. משום שמעבר החום דרך הקיר מתרחש בהולכה, התכונה שקובעת את קצב המעבר היא המוליכות התרמית של הקיר כולו, הנמצאת ביחס הפוך למקדם ההתנגדות התרמית הכוללת של כל שכבותיו.



קיר בנוי
עם בידוד חצוני



קיר מבטון יצוק
עם בידוד חצוני

איור 18.2. דוגמאות של חתכי קירות העומדים בדרישות העקרוניות של "קיר רב-שכבתי". (בשני המקרים, הגימור החצוני מתבסס על טיח אקרילי מיוחד בעל הדבקות טובה לשכבת הבידוד.)

יחסית קבועה למרות שינויים כגון הפסקה פתאומית בחימום או קירור. כמוכן, המסה גם מאפשרת את ניצולם של שינויים מחזוריים בעונות השונות, במסגרת התפקוד של הבניין כולו (ראה **איור 16.1 ואיור 16.2** בפרק 16):

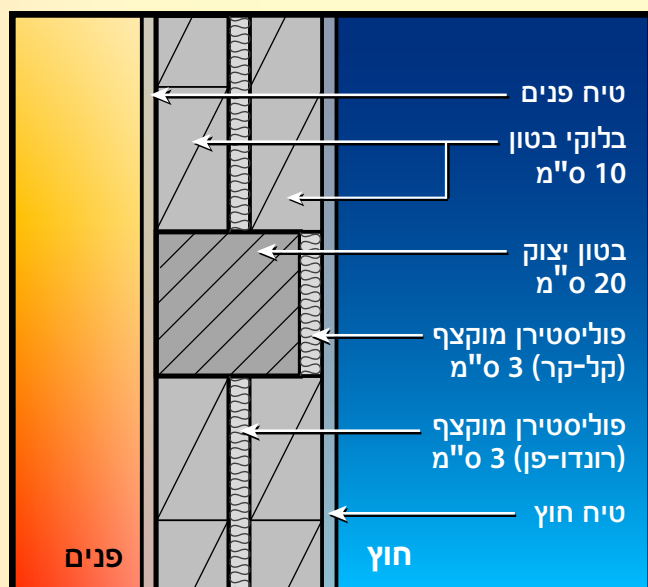
חורף – ניתן לאגור חום בתוך המסה בשעות היום באמצעות קליטה ישירה של קרינת שמש (או להפעיל מערכת חימום באותן שעות, כאשר צריכת החשמל הארצית אינה בשיאה). בשעות הלילה הקרות יותר, הבידוד מונע הפסדי חום כלפי חוץ והחלל הפנימי מחומם על ידי המסה החמה.

קיץ – בשעות הלילה הקרירות יחסית, מסלקים חום מהמסה באמצעות אוורור מפולש. המסה הקרירה סופגת עודפי חום מהחלל הפנימי בשעות החמות, כאשר הבידוד מונע ממנה לתחמם.

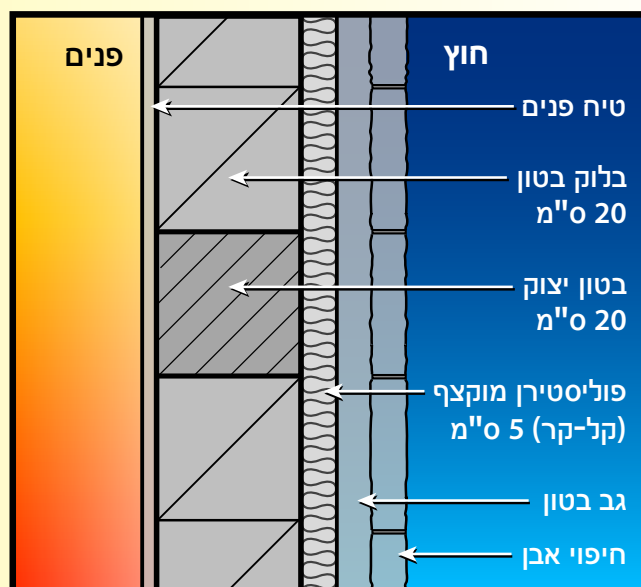
להשפעה המשולבת של בידוד ומסה תרמית יש משמעות שונה באזורים שונים, ובהתאם להפעלת הבניין. במישור החוף, למשל, תנודות הטמפרטורה הן יחסית מתונות, עומס החום בקיץ מתפרס על יותר

קיבול החום הנפחי של חומר קשור באופן ישיר למשקל הסגולי של החומר, כך שלחומרים צפופים כגון בטון יש קיבול חום גבוה יחסית (ראה **טבלה 6.3** בפרק 6). יכולתם לספוג חום ולאגור אותו קשור גם לתכונה נוספת: חומרים "כבדים" מתאפיינים, כאמור, במוליכות תרמית גבוהה, כך שתרומתם לבידוד המעטפת עלולה להיות זניחה. לכאורה, שתי הדרישות הללו – התנגדות תרמית גבוהה וקיבול חום גבוה – מנוגדות זו לזו בכל חומר נתון.

מה שנדרש אם כך, במצב תרמי דינאמי, הוא שילוב של שני סוגי חומר שעונים על שתי הדרישות האנרגטיות: **בידוד תרמי ומסה תרמית**. ביחד, הבידוד והמסה מאפשרים צמצום של משרעת הטמפרטורה במשך היום, וכן יצירת פער זמן בין שינוי הטמפרטורה מחוץ למבנה לבין השפעתו בתוך המבנה. ישנה חשיבות עליונה למיקום היחסי של סוגי החומר בחתך הקיר: כדי שהמסה תווסת את האקלים הפנימי של הבניין, וגם תהיה מבודדת מעומסי האקלים החיצוניים, היא חייבת להיות בצד הפנימי של הקיר. משמעותו של היחס הבסיסי הזה היא בכך שהבניין ישמור על טמפרטורה



קיר "בלוק כפול"
עם בידוד מוגן



קיר מחופה אבן
עם בידוד מוגן

איור 18.3. דוגמאות של חתכי קירות העומדים בדרישות העקרוניות של "קיר רב-שכבתי". (בשני המקרים, הגימור החצוני ברוב שטח הקיר אינו מבוסס על טיח מיוחד.)

כאשר הם חשופים לתנאי חוץ, ולכן יש חשיבות מיוחדת לשכבת קיר נוספת – חיפוי חיצוני. מעבר לתפקידיהם הקשורים להגנה מכאנית ומראה חיצוני של הבניין, לחומרי החיפוי יש תפקיד תרמי מרכזי: בליעה והחזרה של קרינת השמש תלויות בגוון וחסיפוס של הגימור החיצוני.

המלצה: יש להתייחס לקירות החיצוניים של הבניין כמערכת רב-שכבתית, שעונה על הדרישות הדינאמיות של האקלים המקומי בכל עונות השנה. חתך הקיר יהיה מורכב מחומרים שנותנים מענה על הצורך באגירת חום פנימית, התנגדות תרמית, וגימור חיצוני.

* * *

בהתאם לאזור אקלימי ואופן הפעלת הבניין, ייקבעו סוגים, כמויות, ומיקומם היחסי של **מסה תרמית**, **חומרי בידוד** ו**חומרי גמר**. עקרונותיהם של היחסים בין חומרים בקיר רב-שכבתי חלים על כל המעטפת החשופה לתנאי חוץ, ובמיוחד על **גג מגן**.

שעות ביממה, וקרינת השמש בחורף מוגבלת בשל ריבוי עננות. במבנים ציבוריים כגון אולמות התכנסות, אשר מאוכלסים לפרקי זמן קצרים ועיקר עומס החום בנסיבות אלה הוא פימי (כאשר הפוטנציאל לנצל אמצעים פאסיביים מצומצם והמצב התרמי פחות דינאמי), בולטים יותר היתרונות של חומרים בעלי צפיפות בינונית כגון בטון תאי ("איטונג"), שמספקים התנגדות תרמית סבירה יחסית לקיר מסיבי לא מבודד, וקיבול חום סביר יחסית לקיר מבודד לא מסיבי (דוגמת בניה קלה, כאשר הקיר בנוי משלד עץ או פלדה). הניצול של "חומרי הביניים" כגון איטונג מוגבל בכך שהם בד"כ מהווים חומר מילוי בלבד, וחלק ניכר מהקיר מורכב מאלמנטים קונסטרוקטיביים (עמודים, קורות, חגורות וכו') מבטון יצוק. ב"גשרים התרמיים" האלה יש צורך בבידוד תרמי נוסף – בצידו החיצוני של הבטון.

באיור 16.2 ואיור 16.3 מוצגות מספר דוגמאות של חתכי קיר העומדים בקריטריונים המתוארים כאן: לכולם יש שכבה של חומר מסיבי בצד הפנימי, ושכבה של בידוד בצידו החיצוני של המסה. חומרי הבידוד האופייניים בארץ, כגון פוליסטירן מוקצף, אינם עמידים



חומר	r_i
שכבת גבול פנים	0.12
טיח פנים	0.01
בטון (20 ס"מ)	0.10
פוליסטירן מוקצף (5 ס"מ)	1.25
טיח חוץ	0.02
שכבת גבול חוץ	0.04
סה"כ (R_{tot})	~1.54

איור 19.1. ההתנגדות התרמית הכוללת של קיר מחושבת כסכום ההתנגדויות של כל שכבותיו.

...כחלק חיוני של **קירות רב-שכבתיים** ושל **גג מגן**, חומרים שמפחיתים כניסה או יציאה של חום דרך המעטפת הנם חיוניים לחסכון באנרגיה.

19. חומרי בידוד

אחת מהדרכים הבסיסיות ביותר שעומדת לרשות האדריכל לעודד חסכון באנרגיה הנה לדאוג לכך שמעטפת הבניין תהיה מבודדת היטב: בידוד תרמי מקטין את המעבר פנימה של חום בלתי רצוי בקיץ, ומצמצם את איבוד החום במשך החורף.

על פי איזה קריטריונים ניתן לקבוע את הכמות והמיקום של חומרי בידוד?

* * *

הפרשים גדולים בין טמפרטורת הפנים הרצויה לבין טמפרטורת החוץ על פני המעטפת גורמים למעבר כמויות גדולות של אנרגיה מהפנים אל החוץ ולהפך, וגורמים להתחממות החלל הפנימי או להתקררותו. אנרגיית חימום או קירור חייבת להיות מושקעת במערכת לצורך החזרת הטמפרטורה הפנימית לתחום הרצוי.

לבידוד. לכן, במקרים רבים נדרשים חומרים ייחודיים – **חומרי בידוד**. לחומרים אלה, המתאפיינים במשקלם וחוזקם הנמוכים בנוסף לכושר הבידוד הגבוה שלהם, יש תפקיד מוגדר ולפעמים אף בלעדי: להפחית מעבר חום דרך המעטפת.

לכן, השקעת האנרגיה הנדרשת כדי לשמור על תנאי נוחות קשורה ישירות ליכולת המעטפת להתנגד למעבר חום. משום שמעבר החום דרך אלמנטים כגון קירות ותקרות מתרחש **בהולכה**, התכונה שקובעת את קצב המעבר היא המוליכות התרמית של האלמנט.

בטבלה 19.1 מוצגת רשימה של חומרי בידוד אופייניים בבניה ישראלית ותכונותיהם. בולט היחס ההפוך בין כושר הבידוד והמשקל של החומר – כלומר, חומרי בידוד נוטים להיות חומרים קלים. ניתן להבחין גם במשמעות העובי עבור חומרים שונים: כדי לקבל ערך התנגדות של $R=1.0$, נדרש בקירוב 3 ס"מ של חומר מוקצף (לוחות פוליסטירן מוקצף או פוליאוריתן מוקצף), אבל אותו ערך מחייב 7-8 ס"מ של טיח תרמי (כמות שעלולה להיות בעייתית מבחינה יישומית). התנגדות דומה מתקבלת מקיר שבנוי מבלוקי בטון תאי (כגון איטונג) בעובי 20 ס"מ, או לחילופין משכבה של 2-3 ס"מ בידוד מוקצף.

מקדם ההולכה של אלמנט במעטפת נמצא ביחס הפוך למקדם ההתנגדות התרמית הכוללת של כל שכבותיו – דהיינו, לסכום ההתנגדויות (ערכי הבידוד) של כל החומרים שבחתך הקיר או התקרה, ללא תלות בסדר השכבות (איור 19.1). מאחר וההתנגדות תלויה גם בתכונות החומר (כושר הבידוד) וגם בעובי שלו, ניתן באופן תיאורטי ליצור מעטפת מבודדת היטב באמצעות אלמנט עבה מאוד, שמורכב מחומר אחד או יותר, גם אם אין לאף אחד מהחומרים המרכיבים את האלמנט כושר בידוד גבוה.

אולם בפועל, ישנן מגבלות על עובי המעטפת ועל תרומתם של חלק מהחומרים (כגון בטון קונסטרוקטיבי)



התנגדות תרמית לס"מ עובי [מ"ר מ"צ\וואט]	מוליכות תרמית [וואט\מ"מ' מ"צ]	צפיפות [ק"ג\מ"ק]	החומר
0.33	0.030	27	פוליאוריתן מוקצף
0.31	0.032	30	פוליסטירן מוקצף (קל-קר)
0.22	0.045	12-16	צמר סלעים וצמר זכוכית
0.12	0.082	250	טיח תרמי
0.15	0.065	100	פרליט\ורמיקוליט מותפח
0.045	0.22	650	בטון תאי
0.007	1.40	2000	טיח צמנט
0.005	2.10	2400	בטון
0.00015	67	7800	ברזל

טבלה 19.1. תכונות של חומרי בידוד וחומרי בניין אחרים על פי ת"י 1045 (2003).

כמות הבידוד

כמות הבידוד הדרושה תלויה בקיצוניות של האקלים המקומי, יחסית לתנאים הרצויים בתוך הבניין ובהתאם לדגם השימוש בו והפעלתו. רמת הקיצוניות משתקפת בעיקר בטמפרטורות המרביות בעונת הקירור (כלומר בקיץ ובימי שרב) והמזעריות בעונת החורף. יש לזכור, עם זאת, שהעומס התרמי שאליו נתונה המעטפת כולל גם חשיפה לקרינת שמש ורוחות חזקות, ומשתנה לפי הלחות האופיינית, בעונות השונות של השנה.

בישראל, למרות שטחה הקטנה, ישנם הבדלים אקלימיים משמעותיים שמצדיקים דרישות שונות לבידוד של בניינים. חלוקת הארץ לארבעה **אזורים אקלים**, על בסיס טמפרטורות אוויר אופייניות, משמשת כבסיס לתקן ישראל 1045 לבידוד תרמי של בניינים – הקובע, על פי חוק, את ההתנגדות התרמית המינימאלית של בניינים בכל אחד מאזורי האקלים המוגדרים. הדרישות הצנועות ביותר נקבעו ברצועת החוף (אזור א'), שמתאפיינת בטמפרטורות מתונות יחסית. באזור ב' (שכולל את מישור החוף והשפלה, רוב הנגב, ומקומות אחרים), אזור ג' (אזור ההר) ואזור ד' (בקעת הירדן והערבה) הדרישות עולות באופן הדרגתי עם הקיצוניות של האקלים (טבלה 19.2).

ניתן לראות בטבלה 19.2 שהדרישה לבידוד בת"י 1045 מוגברת בתקרה עליונה: הגג הנו אלמנט מעטפת רגיש במיוחד, שחשוף לעומסי הקרינה החזקים ביותר בקיץ ולהפסדי חום אל השמיים בחורף. התקן מתייחס גם למשקל (מסה ליחידת שטח) של האלמנט, כך שהדרישות עולות במקרה של בניה יותר כבדה ויורדות עבור בניה קלה. הערכים בטבלה 19.2 מבטאים דרישות עבור קירות ותקרות בעלי מסה בינונית של 200 ק"ג למ"ר – משקל שמייצג (בקירוב) קיר בנוי מבלוקי בטון רגילים ללא אלמנטים קונסטרוקטיביים, או לחילופין קיר ששטחו מורכב מ-70% בלוקי איטונג בעובי 20 ס"מ ו-30% אלמנטים מבטון יצוק (עמודים וכו').

הרכב הקיר בדוגמה השנייה (איטונג) ממחיש גם שיקול חשוב בבחירת חומרי בידוד: בקיר שבנוי מבלוקי מילוי (כגון בלוקי בטון חלולים, איטונג, פומיס וכו'), האלמנטים הקונסטרוקטיביים מהווים "גשרים תרמיים" – שדרכם מעבר החום מוגבר יחסית לחתך האופייני עקב המוליכות הגבוהה של הבטון הצפוף. על כן ערכי הבידוד המינימליים הדרושים בתקן מתייחסים לחתך קיר אופייני, ואורכם המרבי של גשרים תרמיים מוגבל בהתאם לאזור ועובי השכבות בקיר.



התנגדות תרמית (R) מינימלית של אלמנטי מעטפת על פי תקן ישראל 1045 (מ"ר מ"צ\וואט)				
אזור א'	אזור ב'	אזור ג'	אזור ד'	
0.60	0.70	0.85	1.00	קיר חוץ
0.80	0.90	1.10	1.40	תקרה עליונה
עבור אלמנטים סופגים בעלי מסה של 200-300 ק"ג\מ"ר בבנייני מגורים				

התנגדות תרמית (R) מינימלית מומלצת של אלמנטי מעטפת* (מ"ר מ"צ\וואט)				
אזור א'	אזור ב'	אזור ג'	אזור ד'	
1.00	1.20	1.40	1.60	קיר חוץ
2.00	2.40	2.80	3.20	תקרה עליונה
* על פי הקריטריונים לבניה ירוקה של מפעל הפיס (מבוסס על ת"י 5282)				

טבלה 19.2. התנגדות תרמית מינימלית נדרשת (על פי ת"י 1045, למעלה), ומומלצת (למטה) עבור קירות ותקרות בבנייני מגורים.

מיקום הבידוד

כאמור, מיקום הבידוד בחתך האלמנט לא משפיע על ערך ההתנגדות של האלמנט כולו. למרות זאת, למיקום הבידוד יש השפעה חשובה על התפקוד התרמי של המעטפת במצב דינמי, שבו זמינות האנרגיה משתנה בתדירות גבוהה (למשל, כשיש תנודות חדות בטמפרטורה בין יום ולילה). כאשר הבידוד ממוקם בצד החיצוני של שכבת חומר מסיבי בקיר רב-שכבתי, הבידוד מפחית את התחממות המסה בשעות החמות של היום בקיץ, ואת התקררותה בלילות חורף קרים. בתקופות אחרות, הבידוד החיצוני פועל באופן הפוך: בלילות קיץ, הוא מאפשר חשיפת המסה הפנימית לאוויר קריר שזורם דרך החלל באמצעות אוורור מפולש, בעוד שבשעות היום בחורף הוא מאפשר חשיפה של אותה מסה פנימית לקרינת שמש, באמצעות קליטה ישירה (ראה איור 16.1 ואיור 16.2 בפרק 16).

באיור 19.2 (א'-ד') מוצגות דוגמאות של חתכי קיר שמשלבים בידוד תרמי ומסה פנימית, ומבחינת ערכי ההתנגדות התרמית ומכמות המסה, עומדים בהמלצות

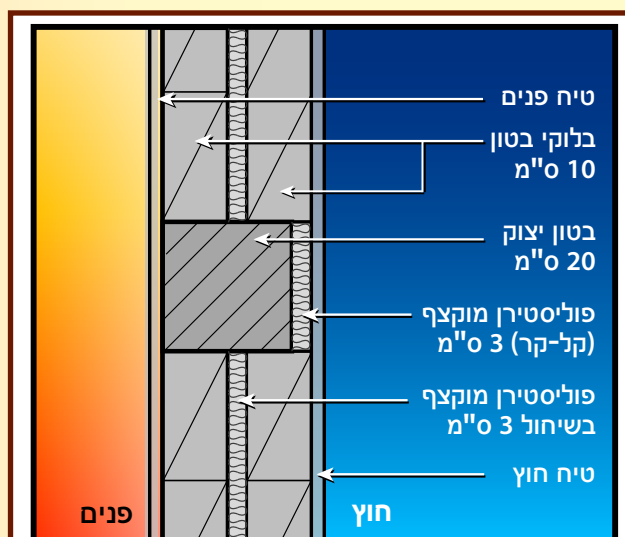
שיקול נוסף שמקבל ביטוי בת"י 1045 הנו צבע המשטח החיצוני של הקיר, משתנה שעלול להשפיע רבות על מעבר החום. כמות החום העוברת דרך הקיר תלויה בהפרש הטמפרטורה בין שני משטחיו (הפנימי והחיצוני), וכאשר חומרי גמר בגוונים כהים חשופים לקרינת שמש, אנרגיה רבה נבלעת ופני הקיר מתחממים מעל טמפרטורת האוויר. לכן שיעור הבידוד הנדרש קשור גם לצבע של המשטח החיצוני, כאשר קיר ללא גימור בהיר חייב להיות מבודד יותר טוב – בעיקר באזורים חמים כגון הערבה.

בכל מקרה מומלץ להתייחס לערכים בתקן כדרישת מינימום (ראה גם ערכים מומלצים בטבלה 19.2), בהבנה שבאופן כללי תוספת מעל סף זה יביא לחסכון נוסף באנרגיה, ומומלץ בכל אזור לבודד ככל האפשר אלמנטים קונסטרוקטיביים כדי למנוע גשרי חום וקור. יחד עם זאת, השפעתו של כמות הבידוד אינו לינארית: התועלת המושגת מכל הגדלה נוספת בעובי הבידוד, מבחינת השיפור בטמפרטורת פנים או חיסכון באנרגיה, הופכות לשוליות יותר ויותר.



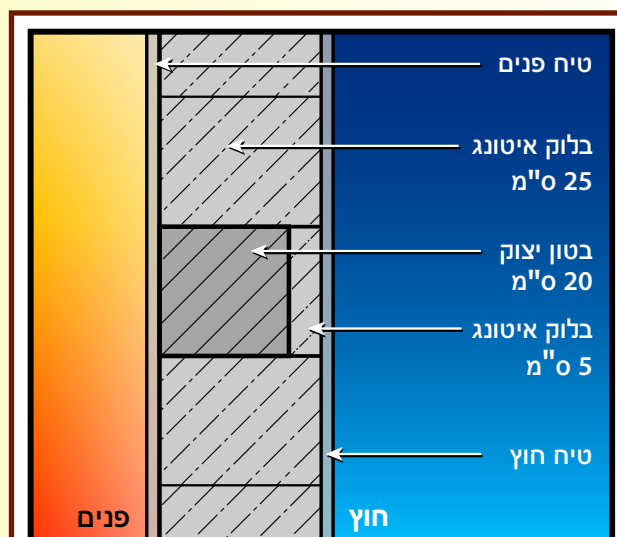
אפילו השפעה שלילית, משום שקיבול החום הנמוך של חומר הבידוד מונע בליעת עודפי חום במעטפת ואגירת החום לאורך זמן. במקרה זה האמצעים ה"פסיביים" (כגון קליטת שמש בחורף או אוורור לילה בקיץ) פועלים

המוזכרות בטבלה 19.2 עבור ארבעת אזורי האקלים. באיור 19.3 מוצגים חתכים נפוצים נוספים, יחד עם תכונותיהם. למיקום הבידוד בצד הפנימי ולא החיצוני עלול להיות



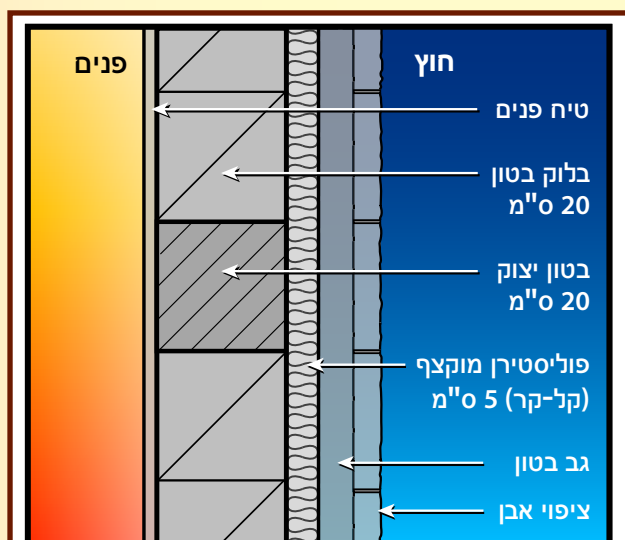
(ב) קיר בלוק כפול בודד

התנגדות אופיינית (ובגשר) 1.60 (1.03) ~ 300
מסה פנימית (ק"ג/מ"ר) (ק"ג/מ"ר)



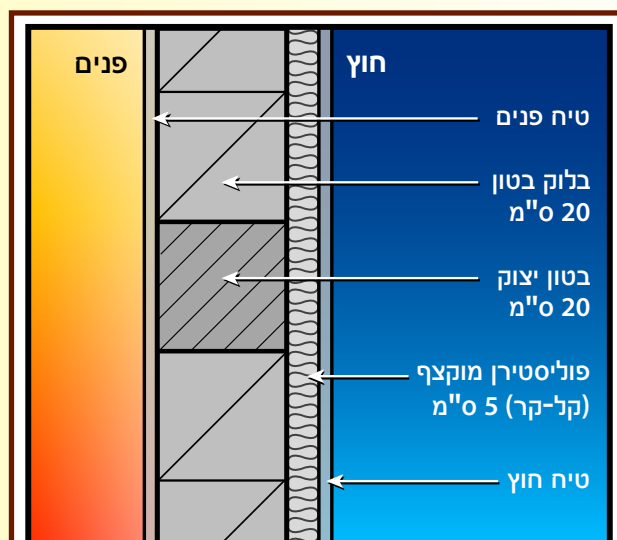
(א) קיר בלוק איטונג 25

התנגדות אופיינית (ובגשר) 1.44 (0.53) ~ 250
מסה פנימית (ק"ג/מ"ר) (ק"ג/מ"ר)



(ד) קיר מחופה אבן

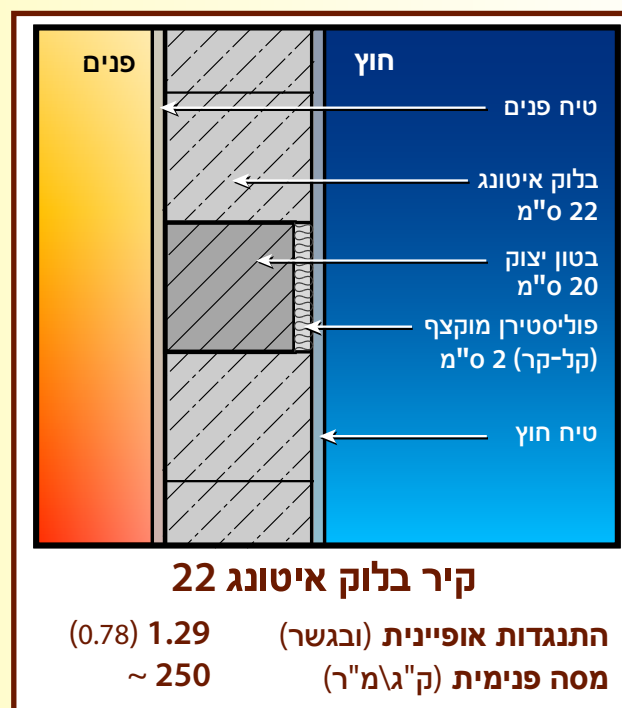
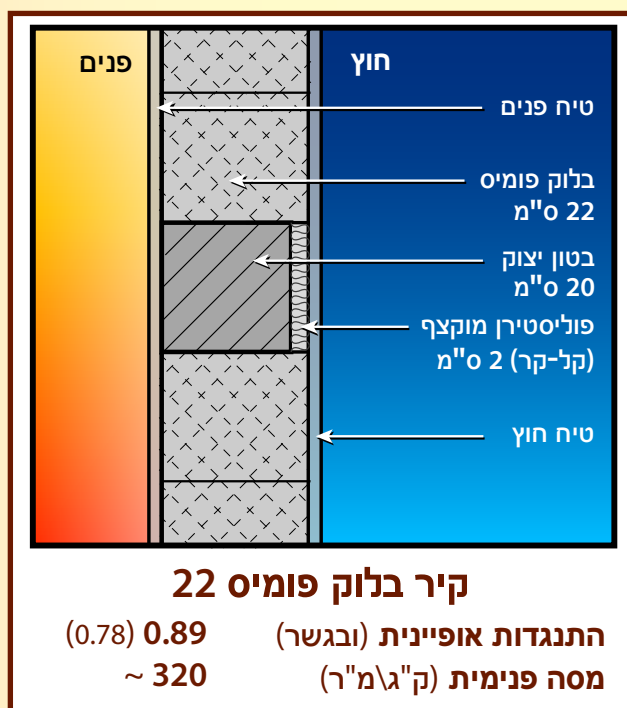
התנגדות אופיינית (ובגשר) 1.77 (1.56) ~ 350
מסה פנימית (ק"ג/מ"ר) (ק"ג/מ"ר)



(ג) קיר בלוק 20 מבודד

התנגדות אופיינית (ובגשר) 1.74 (1.53) ~ 350
מסה פנימית (ק"ג/מ"ר) (ק"ג/מ"ר)

איור 19.2: חתכי קיר שונים, יחד עם ערכי ההתנגדות התרמית האופיינית (מ"ר מ"צ/וואט), ההתנגדותם בגשר תרמי, וכמות המסה הפנימית. ארבעת החתכים (א-ד) עומדים בהמלצות עבור ארבעת אזורי האקלים (א-ד) בטבלה 19.2.



איור 19.3. חתכי קירות נפוצים, יחד עם ערכי ההתנגדות התרמית וכמות המסה הפנימית.

ויצירתה בד"כ דורשת חומרי בידוד ייחודיים. יש לקבוע את כמות הבידוד בהתאם לקיצוניות של האקלים האזורי: יש צורך בבידוד מוגבר באזורים הרריים ויבשים. חשוב להרבות בבידוד הגג העליון, ולא להזניח את הגשרים התרמיים הנוצרים במעטפת. מומלץ להתייחס לערכי הבידוד הרשומים בתקן ישראל 1045 כדרישה מינימלית, ולהגדיל את כמות הבידוד מעל סף זה בהתאם למגבלות מעשיות, כלכליות ואחרות. ברוב המקרים מומלץ למקם את הבידוד בצדו החיצוני של הקיר, כדי להגדיל את התועלת האפשרית של אמצעים פסיביים לחימום וקירור הבניין.

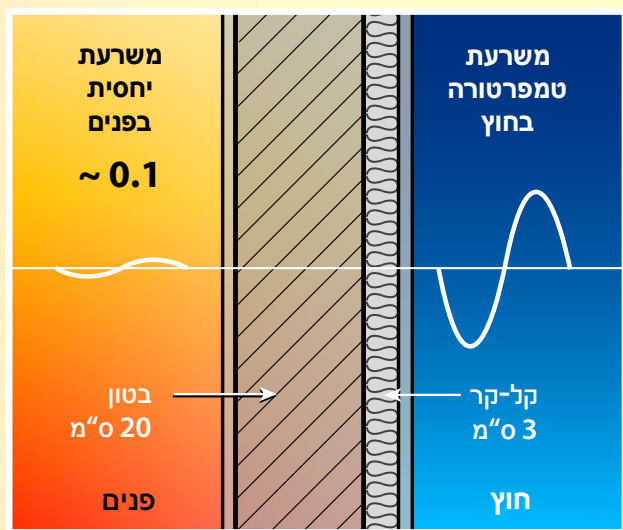
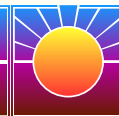
* * *

כאשר קובעים את כמות וסוג החומר המבודד יש להתחשב גם בהשלכות ייצורו על **אנרגיה וסביבה**, ובשילוב הבידוד עם **מסה תרמית** ועם **חומרי גמר** במסגרת של **קיר רב-שכבתי** ושל **גג מגן**. יש להתחשב בבידוד תרמי הולם גם בטיפול ב**פתחים** במעטפת, באמצעות מוצרים כגון זיגוג מבודד ותריסים ניידים.

באופן מיידי לחמם או לקרר את האוויר הפנימי, במקום שהשפעתם תשמר לשעות מאוחרות יותר – כאשר הצורך בחימום או קירור בד"כ בשיאו. הורדת קיבול החום תגרום לתנודות טמפרטורה גדולות יותר בתוך הבניין: בקיץ, בשל חום שנכנס אליו על ידי חדירת אוויר או קרינת שמש דרך החלונות, הטמפרטורה בפנים הבניין תעלה במהירות. בחורף, עם חדירת מעט אוויר קר לבניין ואיבוד אנרגיה דרך המעטפת, יתקרר הבניין במהירות. בשל כך תגדל מאוד תנודת הטמפרטורה היומית (מקסימום-מינימום) גם בחורף וגם בקיץ. (להמשך הדיון על **מסה תרמית** ראה את הפרק הבא.)

ישנם מקרים שבהם רצוי בכל זאת למקם את הבידוד בצד הפנימי של המעטפת, כתוצאה מסוג החלל ודגם השימוש בו. דוגמא לכך הם אולמות התכנסות ממוזגים, אשר מתפקדים בפרקי זמן קצרים יחסית תחת עומסים פנימיים גדולים (מספר רב של משתמשים) ואשר נעשה בהם שימוש באמצעים אקטיביים למיזוג אוויר. בחללים כגון אלה, בידוד פנימי מנטרל את מסת הבניין ומאפשר חימום או קירור מהיר, מבלי להשקיע אנרגיה רבה ב'הכנת' האולם לשימוש.

המלצה: מעטפת בניין מבודדת היטב הנה חלק הכרחי של בניה מודעת אנרגיה בישראל,



איור 20.1. הקטנה במשרעת הטמפרטורה היומית בצד הפנימי של מעטפת מסיבית, לעומת זאת שבחוץ.

...בקירות רב-שכבתיים, גג מגן, מחיצות פנים, ורצפת הבניין – ובמיוחד באלה שבאים במגע עם הקרקע, היכולת לאגור חום משחקת תפקיד מרכזי בתפקוד התרמודינמי של הבניין.

20. מסה תרמית

ברוב אזורי הארץ, ישנן תנודות טמפרטורה חדות בין יום ולילה וימים רבים שבהם קרינת השמש חזקה. האם ניתן להפוך מצב זה של חוסר יציבות תרמית ממגבלה להזדמנות, ולנצל את תנאי האקלים לטובת הנוחות והיעילות של הבניין?

* * *

בניין שמתוכנן תוך דגש על שימור אנרגיה – אפילו אם הוא מבודד ואטום היטב – לא יכול לנצל את האנרגיה ה"טבעית" הטמונה בתנודות המחזוריות של האקלים המקומי אם אין בו מנגנון לאגירת חום לאורך זמן. התכונה שמאפשרת אגירת כזו – **קיבול החום** של הבניין – משפיע על תפקודו התרמי במספר דרכים משולבות:

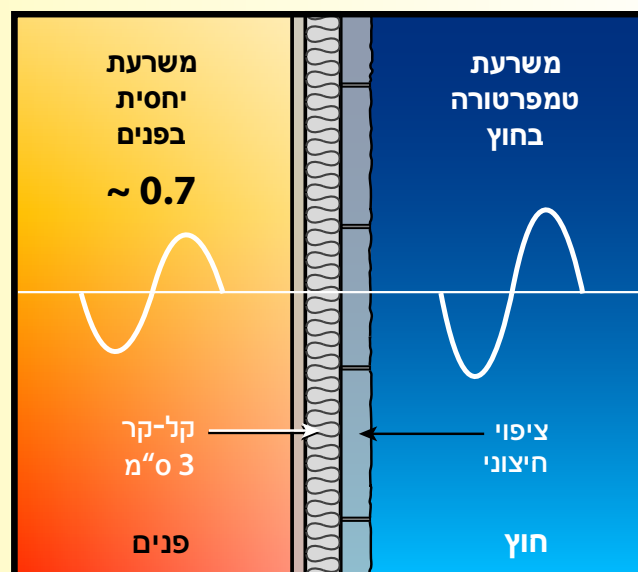
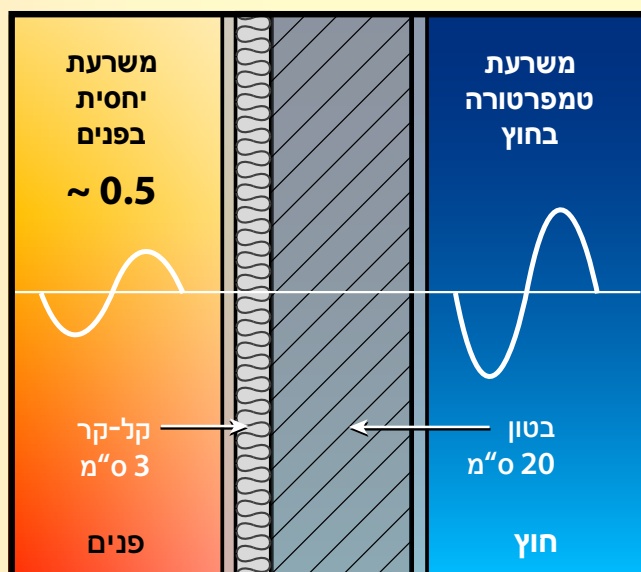
קיבול חום גבוה אופייני לחומרים מסיביים – כלומר, חומרים בעלי משקל גבוה ליחידת נפח, ושמישמים בנפחים גדולים בתוך הבניין (ראה **טבלה 6.3** בפרק 6). על כן החומר האוגר אנרגיה מכונה **מסה תרמית** – כאשר כמותו במעטפת הבניין ובמחיצותיו, ומיקומו ביחס לבידוד, משפיעים משמעותית על תנאי הנוחות במבנה. ניתן לראות דוגמאות של כמויות מסה בחתכי קיר אופייניים באיור 19.2 ואיור 19.3 בפרק 19.

בטון ומוצריו הם החומרים המקובלים ביותר לבנייה בישראל. בשל קיבול החום הגבוה יחסית של בטון, השפעתם של שינויי טמפרטורה מהירים מחוץ לבניין על הטמפרטורה בתוך בניין העשוי בטון מוקטנת (איור 20.1), והם גם מתרחשים בתוך הבניין בפיגור בן מספר שעות. ניתן לנצל תופעה זו על מנת לחסוך באנרגיה. דוגמה: אפשר לחמם או לקרר בית 'כבד', מבודד היטב במעטפתו החיצונית, בשעות בהן צריכת החשמל הארצית נמוכה. מסת הבניין תאגור בתוכה את החום או הקור, ותוכל להבטיח נוחות תרמית גם בשעות שיא של צריכת החשמל.

באשר למבנים קלים, כמו בנייני עץ, הרי אלה מגיבים במהירות לשינויי טמפרטורה חיצוניים ופנימיים: בניין

(א) עם עליית קיבול החום של המעטפת, המשרעת של הטמפרטורה היומית (ההפרש בין מינימום למקסימום) בתוך המבנה בשל שינוי טמפרטורה וקרינה חיצוניים תקטן. יחד עם זה, יגדל פיגור הזמן בין טמפרטורות השיא (מקסימלית או מינימלית) בפנים לבין טמפרטורות השיא בחוץ. את השילוב בין שתי התופעות הללו – מיתון התנודות ופיגור הזמן של מהלך הטמפרטורה בפנים יחסית לסביבה – ניתן לתאר כמצב של יציבות תרמית, שבו נמנעים שינויים קיצוניים שעלולים להביא לאי-נוחות קשה (ראה איור 16.1 ואיור 16.2 בפרק 16).

(ב) קיבול חום גבוה גורם גם להקטנת הרגישות של הבניין לחום שנוצר בתוכו (ממכשירים יוצרי חום, אנשים, קרינת שמש, חדירת אוויר וכו'). כשקיבול החום הוא גבוה, מעטפת הבניין יכולה לבלוע עודפי חום מהאוויר במהירות ולמתן את השינוי בטמפרטורת החדר. כאשר קיבול החום קטן, יצירת חום פנימי בתוך המבנה תגרום לעלייה מהירה וגדולה יותר של טמפרטורת האוויר שבתוכו. באופן דומה, כל איבוד חום מהבניין יגרום לירידת הטמפרטורה בתוכו בצורה מהירה.



איור 20.2. הקטנה במשרעת הטמפרטורה בצד הפנימי של מעטפת קלה (ימין), ושל מעטפת עם בידוד פנימי (שמאל).

המלצה: ברוב המקרים, קיר מומלץ הוא קיר בעל שכבה פנימית מחומר מסיבי, כגון בטון או בלוק בטון, בדרך כלל בעל עובי מינימלי של 10 ס"מ, המכוסה בשכבת בידוד אשר ברוב המקרים מומלץ למקם בצדו החיצוני של הקיר. המסה מספקת את האגירה התרמית הדרושה, והבידוד מקטין את מעבר החום דרך הקיר.

הצורך במסה תרמית פנימית בולט באזורי הארץ בעלי תנאים תרמיים קיצוניים – כולל אזורי ההרים והמדבריות (למשל בנגב ובערבה). באזורים אלה ישנן תנודות טמפרטורה רחבות במיוחד במחזור היומי, והמסה הפנימית עשויה למתן ולייצב את הטמפרטורות בתוך הבניין. בחלק מהמקרים, כגון בעונת הקיץ בנגב, הטמפרטורה היומית הממוצעת הנה בתחום הנוחות, למרות ההבדלים החדים בין יום ולילה – ובמקרים אלה, מעטפת מסיבית עשויה להביא למצב של נוחות בכל השעות ללא צורך במיזוג אוויר (ראה את ההשפעות של מסה תרמית **בהדמיה תרמית** של בנין).

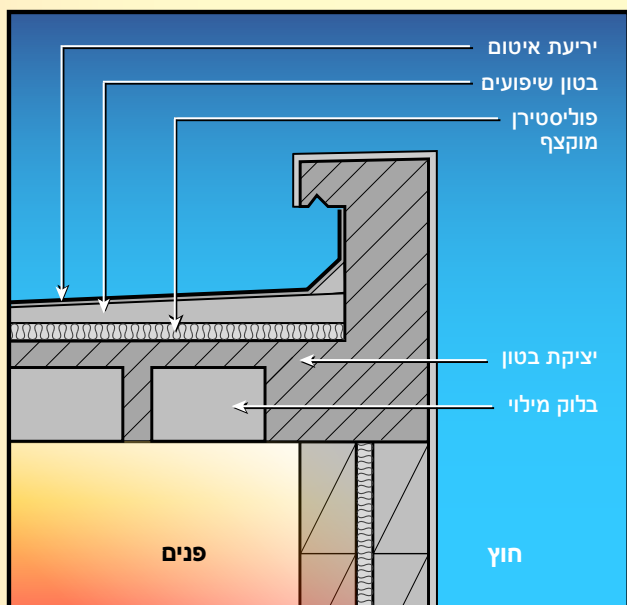
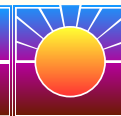
* * *

העקרונות שמנחים את הצורך במסה תרמית בקירות חלים גם על **גגות**, ובמידה מסוימת על רצפות ואלמנטים אחרים שבאים במגע עם הקרקע. את התפקוד התרמי של קירות ניתן לשפר ע"י בחירה מושכלת של **חומרי הגמר**, וכמובן ע"י התכנון של **פתחים** בתוכו.

קל מבודד היטב יחומם מהר על ידי תנור חימום, מה שיכול להיחשב כיתרון, אולם כאשר יכובה התנור, תרד טמפרטורת החדר במהירות יחסית וייגרמו שינויי טמפרטורה חדים הנחשבים בלתי נוחים. תופעה דומה תקרה בעת שיקורר המבנה בקיץ: מזגן פועל יקרר מהר, אולם עם הפסקת פעולת המזגן יתחמם הבניין מחדש במהירות יחסית.

יתר על כן, בבניינים קלים, תעקוב הטמפרטורה הפנימית כמעט ללא פיגור זמן אחר שינויי הטמפרטורה החיצונית. בחורף יהיה צורך לחמם את הבניין בשעות הערב, כאשר צריכת החשמל הלאומית היא הגבוהה ביותר, ובקיץ הצורך במיזוג אוויר יהיה בשעות אחר הצהריים המאוחרות, שוב כאשר צריכת החשמל הלאומית היא בשיאה.

המסה האפקטיבית של הבניין אינה עניין פשוט של בניין קל מול בניין כבד. דופן של בניין כבד יכולה להפוך לבעלת תכונות דומות לבניין קל (מבחינה תרמית), אם יורכב הבידוד בצד הפנימי של המעטפת (איור 20.2). כפי שהוסבר בפרק 19, גם תופעה זו ניתן לנצל במקומות המתאימים. למשל במקרים של אולמות ציבוריים ממוצגים הפועלים מספר שעות מצומצם, יאפשר מיקום הבידוד בצד הפנימי של מעטפת האולם להפעיל המיזוג בצורה אפקטיבית רק בשעות ההפעלה הדרושות. כך לא יהיה צורך להשקיע אנרגיה בקירור מסת הבניין לפני התחלת השימוש, וגם לא תישאר אנרגיה אצורה במסת הבניין אחרי גמר השימוש.



איור 21.1. חתך אופייני של תקרת צלעות.

בדרך כלל חומר כגון בטון קל ("בטון שיפועים"), ומעליו מותקנת שכבת איטום אספלטית או אחרת, לצורך ניקוז מי גשם. במידה ושכבת האיטום חשופה ישירות לקרינת שמש, אז היא משמשת כאחד מחומרי הגמר של המעטפת, מומלץ שהיא תהיה צבועה בצבע בהיר.

מבחינה אנרגטית, תקרת בטון מכילה כמות ניכרת של **מסה תרמית** שעשויה לתרום באופן משמעותי לקיבול החום וליציבות התרמית של הבניין. ריכוז של מסה בתקרה חשוב במיוחד בימי הקיץ – כאשר אוויר חם יחסית עולה בתוך החלל כתוצאה מהסעה טבעית, ובא במגע עם התקרה. במידה וטמפרטורת התקרה נמוכה מזו של האוויר, הבטון יספוג חום מהחלל ויאגור אותו במשך שעות היום החמות. תופעה זו נחלשת במקרה של תקרת צלעות אם המילוי בין הצלעות עשוי מחומר קל (כגון איטונג) בעל מוליכות תרמית וקיבול חום נמוכים.

לאור הרגישות הבולטת של הגג לחילופי אנרגיה, חשוב ביותר שהמסה של תקרת הבטון תהיה מוגנת היטב – והפתרון המומלץ למתן הגנה זו הנו שכבה עבה של חומר בידוד תרמי מעל הבטון. שילוב זה של מסה פנימית ובידוד חיצוני (עליון) מודגשת אפילו יותר מאשר במקרה של **קירות רב-שכבתיים**. כאשר עובי שכבת הבידוד מותאמת לאזור האקלים (ראה **טבלה 19.2** בפרק 19), מסת הגג אינה מתחממת משמעותית בקיץ ואינה מתקררת משמעותית בחורף,

...בבנין מודע אקלים, השפעתם האנרגטית של **צורת המעטפת** ושל חומרי המעטפת מורגשת לא רק בקירות רב-שכבתיים אלא גם במישורי המעטפת העליונים ...

21. גג מגן

מבחינה אקלימית, הגג נמצא במקום הרגיש ביותר במעטפת הבניין. אילו תכונות נדרשות מהגג כדי להפוך אותו מנטל אנרגטי לנכס?

* * *

חשיפתו הישירה לשמיים של הגג יוצרת רגישות מיוחדת – ממספר סיבות:

(1) בימי קיץ, הגג חשוף לקרינת שמש בעוצמה גבוהה יותר מאשר כל מרכיב מעטפת אחרת – דבר שעלול להטיל עומס חום כבד על הבניין.

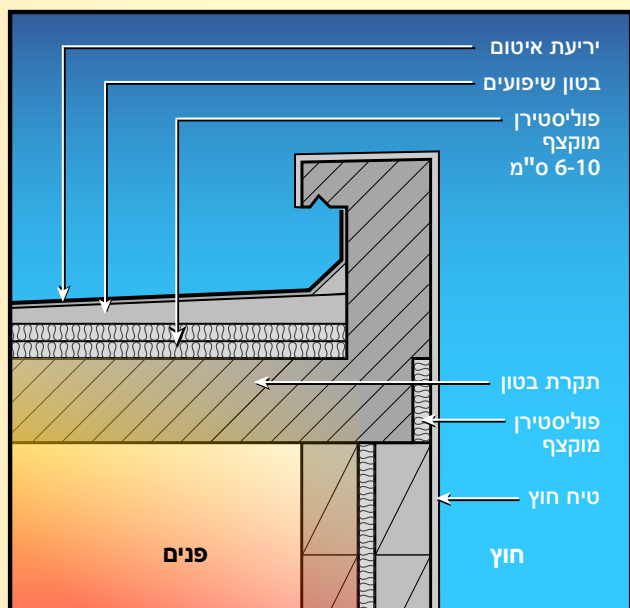
(2) בלילות חורף, הגג חשוף לאיבודי חום גדולים במיוחד – בקרינה ארוכת גלים, וכתוצאה ממגע מוגבר עם האוויר הקריר.

(3) הגג מייצר הגנה בפני גשם (וגם ברד ושלג באזורים גבוהים), דבר שדורש תשומת לב מיוחד לפרטי איטום ולאחזקה וטיפול שוטף.

בישראל הגגות הנפוצים הם גגות שטוחים וגגות משופעים. להלן ניתוח סוגי הגגות האלה מבחינה אנרגטית, אקלימית וטכנית.

גג בטון שטוח

זהו הגג האופייני והמקובל ביותר ברוב המבנים בישראל. הוא עשוי בדרך כלל מיציקת בטון מסיבי ("תקרה מיקשית") או מיציקת בטון מצולע ("תקרת צלעות"). במקרה השני (ראה איור 21.1), חלקו התחתון של התקרה ממולא בבולקי בטון או בטון קל ("איטונג") או בתבניות קלות מפוליסטירן מוקצף ("קל-קר") או חומר קל אחר, המאפשרים להקטין את המשקל העצמי של הגג במידה רבה. מעל המשטח העליון של הגג יצוק



איור 21.2. חתך אופייני של גג בטון "רגיל".

רבה, בשל ירידת טמפרטורת האוויר שמסביבו ובשל קרינה ארוכת גל ממנו לעבר השמים. הפרשים גדולים בטמפרטורת הגג עלולים לגרום למאמצים תרמיים חזקים ולסדקים, בייחוד באזורי החיבורים בין הגג לבין הקירות. ברבים מבנייני הנגב יש סדקים הנמשכים לכל היקפם של חדרים בקומות העליונות.

"גג הפוך"

שיטת בניה אחרת – שנקראת גג "הפוך" – מתייחסת לגג בטון שטוח שבנוי בצורה דומה לגג "רגיל" אך נבדל בדרך שבה הוא מבודד ואטום. משטח הבטון מכוסה בבטון שיפועים ונאטם בחומר איטום מקובל, ומעל שכבת האיטום מניחים לוחות פוליסטירן מוקצף (קל-קר) ומחורצים בתחתיתם כדי לאפשר מעבר מי ניקוז. מעל שכבת הבידוד מניחים אריג שאינו אטום למים (בד גיאוטקני) ושכבת חצץ, או לחילופין מרצפות, להגנה על הבידוד והחזקתו במקומו (כפי שמפורט באיור 21.3).

שיטה זו עונה על בעיה משמעותית בנוגע לגג השטוח. שכבת האיטום נגד חדירת מים נמצאת מתחת לחומר הבידוד ואינה חשופה לתנאי האקלים והבליה החיצוניים. היא מוגנת מהבחינות התרמית והמכנית וחייה מתארכים.

לגג הפוך ישנם גם חסרונות מעשיים. הנגישות לצורכי

והאלמנט המסיבי של הגג הופך לחלק מהמסה אוגרת האנרגיה של הבניין – ובכך מקטין את משרעת הטמפרטורה היומית בתוך המבנה. אם לעומת זאת הגג מבודד והבידוד נמצא בחלקו התחתון, מיקום זה של הבידוד גורם לנטרול המסה הגדולה של הגג כמסה תרמית שאוגרת אנרגיה. ברוב המקרים זהו חיסרון הפוגע בתפקוד האנרגטי של בניין.

ניתן לבצע את הבידוד החיצוני על פי שתי שיטות: אחת מכונה "גג רגיל" והשניה "גג הפוך".

"גג רגיל"

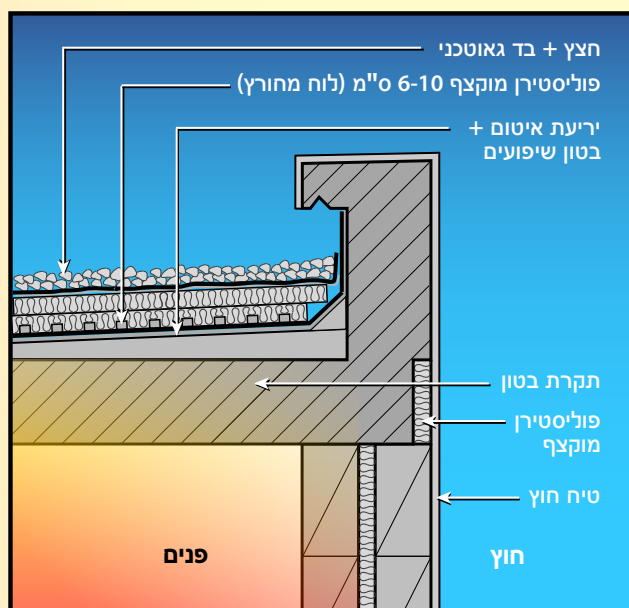
בשיטה אחת מוכרת ומקובלת לבידוד גגות בטון שטוחים, לוחות פוליסטירן מוקצף (קל-קר) מונחים ישירות על הבטון ועל גבי שכבה זו, מיושם בטון השיפועים ועליו יריעות האיטום (כפי שמפורט באיור 21.2). טכנולוגיה זו ידועה ומוכרת בתכנון ובביצוע, ותוצאותיה בדרך כלל הן גג עשוי בצורה טכנית משביעת רצון.

כנגד יתרון זה, יש מספר חסרונות הנובעים מהשילוב בין אופי האקלים והמקום לבין טכנולוגיית הבנייה:

א) במידה ויריעות האיטום העליונות צבועות בצבע לבן, צבע זה עלול לאבד תוך זמן קצר את כושר ההחזרה, ומתחילה לבלוע יותר ויותר קרינה. בתוך זמן קצר עלול לרדת מקדם ההחזרה של הציפוי מערך של 0.6 או יותר לערך של 0.3 או פחות. שינוי מקדם ההחזרה נובע מהשתנות הצבע בשל הזדקנות, לכלוך וכסוי אבק וחול. בעקבות השינוי במקדם ההחזרה משתנות מאוד הטמפרטורות על פני הגג, הן העליון והן התחתון. באמצע הקיץ תעלה טמפרטורת המשטח העליון של גג לבן חדש ב-10 מעלות צלסיוס בקירוב מעל טמפרטורת האוויר, בשל בליעת קרינת השמש. לעומת זאת עלולה לעלות טמפרטורת המשטח העליון של גג שאינו לבן בוהק (מכוסה בחול ואבק) בעשרות מעלות צלסיוס מעל טמפרטורת האוויר בסביבה.

ב) טמפרטורה גבוהה זו של פני האיטום גורמת להמסתם ולהריסתם של רוב חומרי האיטום נגד מים המקובלים בישראל, וכך נוצר מפגע של חדירת מים בתקופת החורף, כאשר הגג מוצף.

ג) פני השטח העליונים מתקררים במשך הלילה במידה



איור 21.3. חתך אופייני של גג "הפוך".

משופע מאשר בגג שטוח. בחורף יהיה שטח גדול יותר שדרכו יאבד חום, ובקיץ יהיה שטח גדול יותר שדרכו ייכנס חום אל תוך הבניין.

חומרים - גגות משופעים עשויים בדרך כלל מחומרים כהים, כגון רעפי חרס, לוחות מתכת או בטון בצבע אדום. חומרים אלה סופגים את רוב קרינת השמש הפוגעת בהם, והטמפרטורה שלהם עולה בהרבה מעל לטמפרטורת האוויר. משום שלחומרים אלה יש מוליכות תרמית גבוהה, חלק גדול מהחום שנוצר מועבר פנימה, וגורם לעליה משמעותית בטמפרטורת החלק התחתון של הגג ובעקיפין של החלל שמתחתיו. במקרה של גג קל יחסית (שעשוי למשל מפח או לוח דק על בסיס צמנט), העלייה של הטמפרטורה היא מהירה יותר. בשל חוסר הקיבול התרמי של מכלול הגג, אין לו כל משמעות מבחינת פיגור הזמן של גל החום, התוקף את פנים הבניין בשעות הקשות ביותר.

לכן, מומלץ שגג משופע יהיה מבודד היטב ובעל פתחי אוורור (חלונות, מפוחים) כדי לשפר את האוורור בעונה החמה. בנוסף, גג משופע מעל חלקו הצפוני של בניין עשוי לאפשר בחורף חדירת קרינה ישירה דרך חלונות עיליים. ניתן למתן את התחממות הגג ע"י שימוש ברעפים לבנים (או חומר גמר מתאים אחר בעל גוון בהיר ומקדם בליעה נמוך), במקום הרעפים האדומים הכהים.

תיקון ואחזקה אל שכבת האיטום נגד מים מסובכת ומסורבלת בהשוואה לגג מסיבי רגיל, וכרוכה בפירוק חלקים משכבות הכיסוי והבידוד. ניתן להקטין את ההסתברות לתקלה זו בביצוע קפדני של שכבת האיטום בעת בניית הגג ובבדיקת הגג על ידי הצפה ממושכת לפני כיסויי בשכבת הבידוד. בנוסף, חיבור מתקנים שונים והצבתם על הגג (דודי שמש, מזגנים, אנטנות וכו') מסובכים מהרגיל. חסרון תרמי אפשרי נובע מקצב הניקוז המוגבל מתחת ללוחות הבידוד: מים קרים עלולים להשאר זמן מה אחרי ארוע גשם, דבר שגורם להתקררות מהירה של תקרת הבטון. לכן עובי הבידוד הנדרש בגג הפוך גדול מן העובי הנדרש בגג רגיל.

גג קל משופע

גג משופע אופייני בארץ בנוי מקונסטרוקציה קלה (מסגרת עץ או מתכת) ומכוסה ברעפים, פח או חומר דומה, כאשר במקרים רבים אין הפרדה בעלת תכונות תרמיות משמעותיות בינו לבין חלל הבניין (למשל גג משופע עם תקרת רביץ אשר אין לה כמעט התנגדות או כושר אגירה תרמית).

הגגות המשופעים ייבחנו כאן מבחינת הגיאומטריה שלהם ומבחינת החומרים שמהם הם עשויים:

גיאומטריה - כאשר זווית השמש גבוהה, גיאומטריית הגג אינה משפיעה משמעותית על רמת הקרינה הפוגעת בו (זהו כמובן המקרה הקשה, בצהרי הקיץ). כאשר זווית השמש נמוכה מזווית שיפוע הגג, עלול לגדול החתך שבו פוגע שטף קרינת השמש בגג והוא יבלע יותר אנרגיה מאשר גג שטוח. במקרה כזה תהיה גם זווית פגיעת קרני השמש בגג קרובה יותר לניצבת, מה שגורם גם כן להגברת כמות הקרינה הנספגת בו. לכן, בגג דו-שיפועי יש גם משמעות להפנייה: כאשר רכס הגג מכוון על ציר צפון-דרום ופני הגג המשופעים פונים למזרח ומערב, הרי עודף האנרגיה הקרינתית נספגת בשעות הבוקר ואחה"צ בקיץ. אבל כאשר הרכס מכוון בניצב למצב ה"ל", עודף קרינה נקלטת על גבי הפן הדרומי בעיקר בחורף.

אם אין מחיצה מבודדת בין החלל העיקרי של הבניין לבין עליית הגג, אז השטח האפקטיבי להחלפת חום בין הגג לבין החוץ יהיה גדול יותר במקרה של גג



"גג מוצל"



איור 21.4. גגות מוצלים בקיבוץ יטבתה שבערבה: הקירוי העליון עשוי מרעפים לבנים על גבי מסגרת עץ, ומרחף מעל הגג השטוח המסיבי כדי לאפשר זרימה חופשית של אוויר.

על פני הגג, שטח מוגדל זה עשוי להעניק יתרון. הסיבה היא שבזוויות שמש גבוהות, סה"כ שטף הקרינה על פני הגג יהיה דומה בין עם זה מישור אופקי או מישור המעוגל (איור 21.5) – אבל סילוק החום מפני השטח ע"י הסעה יהיה יותר יעיל בגג המעוגל (כדוגמת קמרון חצי-גלילי, ששטחו גדול ב-57% מזה של גג שטוח). תופעה זו מתאפשרת משום שבשעות החמות ביום קיץ, טמפרטורת פני הגג צפויה להיות גבוהה יותר מאשר האויר החיצוני שבא איתו במגע, אפילו אם חומר הגמר של גג בעל מקדם בליעה נמוך. בנוסף, החלל הגבוה מתחת לקמרון מאפשר ריכוז של אויר חם יחסית מעל גובה הראש של משתמשי החלל, ובתכנון אוירודינמי מתאים, ניתן גם לשאוב את האויר הזה החוצה דרך פתחי אוורור. בחורף, קמרון בעל ציר מזרחי-מערבי יקלוט יותר קרינה מאשר גג שטוח באותו מפתח (איור 21.5).

השיקול האנרגטי בייצור – היכולת של תקרת בטון מישורית לשאת את משקלה תלויה בכשר ההתנגדות שלה לעומסי כפיפה – אשר דורשת חוזק גבוהה בלחיצה וגם במתיחה. לבטון עצמו יש חוזק גבוה בלחיצה בלבד, והחוזק הדרוש במתיחה מוענק ע"י הפלדה שנמצא בכמויות גדולות בבטון המזויין. הפלדה הינה חומר עתיר במיוחד באנרגיית הייצור (טבלה 21.1), כך שבבניה רגילה בארץ תקרות הבטון אחראיות לחלק ניכר מסה"כ האנרגייה במחזור החיים

יישום מיוחד של גג משופע הינו שילוב של הקירוי הקל עם גג בטון שטוח. ניתן לחלק גגות אלה לשני סוגים עיקריים: אלה המאפשרים זרימת אוויר חופשית בין הגג לבין האלמנט המצל ואלה הסגורים המאפשרים זרימה מוגבלת או אינם מאפשרים זרימה בכלל.

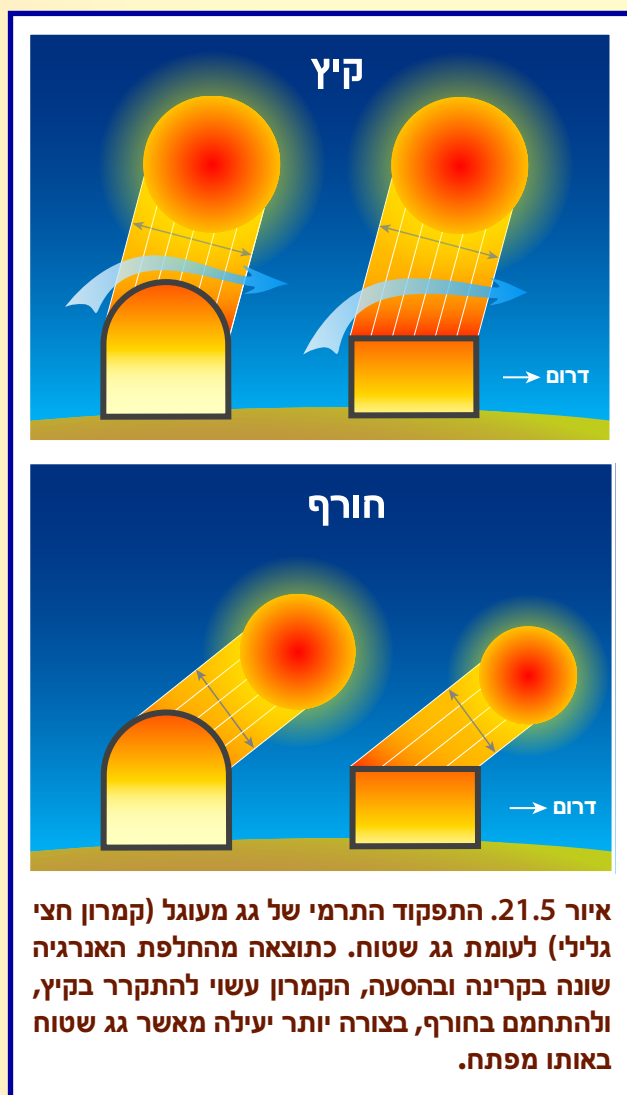
האפקט העיקרי של הצללת הגג הוא צמצום התרומה של קרינת השמש להתחממותו. לצורך זה די למתוח מעל הגג קרום דק העשוי מחומר קל (פח גלי, בד, רשת, עץ) או אפילו צמחייה (במקרה של **גג ירוק**), ואין צורך לבנות גגות רעפים. (פתרון כזה מצא האדריכל מיכאל קון בפרוייקט המגורים לעובדי מפעלי ים המלח אשר נבנה בשנת 1940 בערך). זרימת אוויר חופשית בין הגג לבין האלמנט המצל מבטיחה אי-לכידת אוויר חם בין שתי השכבות.

כאשר הגג המשופע סגור לחילופי אוויר, טמפרטורת האוויר בחלל הסגור מתחת לגג גבוהה בצורה משמעותית מטמפרטורת האוויר החיצוני. אם הגג אטום היטב ואין החלפת אוויר מתחתיו, הטמפרטורה בתוך חלל הגג עלולה להתקרב לטמפרטורת המשטח החיצוני של הגג. שיפור בביצועים התרמיים בבניין אשר לו גג כזה יושג על ידי אוורור הגג תוך כדי שימוש בפתחים מיוחדים או במאווררים, ותוך שימוש בשכבת בידוד או חומר שמחזיר קרינה ארוכת-גל, כגון רדיד אלומיניום. היעילות במניעת התחממות התקרה שמתחת תגדל ככל שכיסוי הגג (ההצללה) יהיה בהיר, אטום פחות ובעל מוליכות תרמית נמוכה יותר.

גגות מעוגלים

למרות שגגות שטוחים ומשופעים הם הנפוצים ביותר בבניה ישראלית, יש יתרונות פוטנציאליים לגגות שאינם מישוריים – כגון כיפות וקמרונות.

השיקול האקלימי – כאמור בהקשר של **צורת המעטפת**, צורה מעוגלת נחשבת כיעילה משום שיש לה שטח פנים קטן יותר מאשר צורה אורתוגונלית שמכילה חלל בנפח זהה. אבל במקרה שגג מעוגל נבנה מעל קירות אנכים, שטחו למעשה גדול יותר מאשר גג שטוח שמכסה אותו מפתח. בימי קיץ, כאשר קרינת השמש מטילה עומס חום כבד במיוחד



של הבניין. במקרה של קמרן, היכולת לשאת את משקלו העצמי נובעת בעיקר מחוזקו בלחיצה (ראה דוגמאות של קשתות מאבן ולבנים, אשר אין להן חוזק משמעותי במתיחה), ולכן בגגות אלה הדרישות לפלדה עתירת אנרגיה עשויה להיות פחותה.

המלצה: כדי להעניק הגנה אקלימית אמיתית, הגג חייב להקטין ככל האפשר את עומס החום הקרינתי שמוטל עליו. האמצעי הבסיסי להשגת מטרה זו הנו שכבת בידוד תרמי בעל התנגדות גבוהה כדי למנוע התחממות יתר בקיץ והתקררות יתר בחורף. מומלץ שהשכבה המסיבית של הגג תהיה פנימית (מתחת לבידוד), ושהבידוד עצמו יהיה מוגן ע"י חומר גמר בהיר או אמצעי הצללה עליונים. ניתן להפחית עוד מהעומס האנרגטי באמצעות תכנון צורני תלת-מימדי, שמפזר את קרינת השמש ומאפשר קירור יעיל בימי הקיץ – וגם חוסך באנרגיית ייצור.

* * *

ניתן לשלב בגג אמצעים ומערכות לקירור פסיבי, תוך ניצול של אידוי מים מפני השטח ומצמחייה, ומקרינה ארוכת גלים אל השמיים.

טבלה 21.1. אנרגיית ייצור של חומרי בניה אופייניים

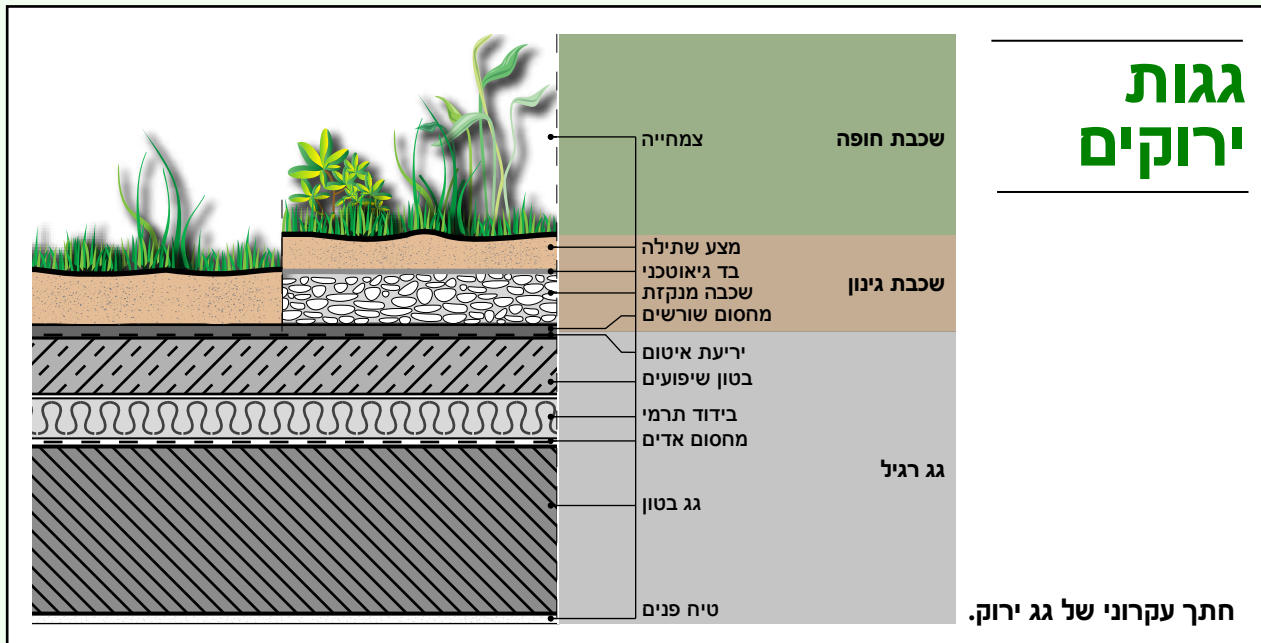
ליחידת נפח^[70]

חומר	MJ/m ³	חומר	MJ/m ³
לבני אפר פחם	184	פוליסטירן מוקצף	2,710
לבני אדמה מיוצבות	938	בטון (לא כולל פלדה)	2,852
בלוקי בטון	1,216	זכוכית	46,766
בלוקי איטונג	1,536	פלדה	273,180
אבן	1,890	אלומיניום	570,420

70. Huberman and Pearlmutter, 2008



גגות ירוקים



תרומה לסביבה העירונית

- הפחתת אי-החום העירוני - אחת הסיבות לאי החום העירוני היא מיעוט הצמחייה והקרקע החשופה, וריבוי המשטחים המרוצפים והבנויים. ניתן להשיב חלק מן השטחים האבודים לעיר על גבי הגגות, אם כי יש לזכור כי ככל שהבניינים גבוהים יותר, השפעת הגג על התנאים בגובה פני הקרקע מועטה יותר.

- ספיחת דו-תחמוצת הפחמן ומזהמים - צמחים מקבעים דו-תחמוצת הפחמן מן האוויר בתהליך הפוטוסינתזה - תרומה רצויה לכל הדעות בסביבה העירונית אשר בה נפלטת כמות גדולה של גז זה לאטמוספירה. מחקרים שונים מראים גם כי חלק מן הצמחים לוכדים אחדים מן המזהמים הנפלטים לאוויר כתוצאה מפעילות האדם. עם זאת, חשוב לציין כי התרומה הישירה של הגגות לאיכות האוויר סמוך לפני הקרקע קטנה מאוד, משום שאין בהכרח ערבוב יעיל בין האוויר אשר בשכבת הגבול הפנימית לבין האוויר בחופה העירונית.

- יצירת בתי גידול ותמיכה במגוון הביולוגי - המגוון הביולוגי בשטח העירוני קטן יותר ושונה ממגוון בעלי החיים המתקיים בסביבה הטבעית. תוספת שטחי צמחייה וקרקע מאפשרים קיום של מיני בעלי חיים

גג ירוק הוא גג אשר עליו הותקנה תשתית ונשתלו צמחים המכסים את רוב השטח.

ישנם שני טיפוסים עיקריים של גג ירוק:

גג אקסטנסיבי - בגג אקסטנסיבי, עובי מצע הגידול הינו קטן - כ-20 ס"מ לכל היותר. גג כזה הוא קל (יחסית), ולכן הגג בדרך כלל אינו דורש חיזוק מיוחד; הוא מתאים לגגות גדולים, לרבות גגות משופעים; והוא איננו דורש תחזוקה רבה. לכן מחירו זול (בהשוואה לגג אינטנסיבי). עם זאת, מגוון הצמחייה שהוא יכול לקיים מצומצם, והתועלת שלו פחותה.

גג אינטנסיבי - בגג אינטנסיבי עובי המצע גדול, ומאפשר גידול צמחייה עשירה ומגוונת. עם זאת, הוא דורש חיזוק של הקונסטרוקציה הנושאת את התקרה, ויקר מאוד בהשוואה לגג אקסטנסיבי. הוא איננו מתאים לגגות משופעים, ומגוון הצמחייה הגדול בדרך כלל דורש תחזוקה. תרומתו בתחומים שונים (ראו בהמשך) רבה מזאת של הגג האקסטנסיבי.

גג ירוק שונה באופן מהותי משאר טיפוס הגגות ה'מקובלים' בבנייה בארץ, כמו בשאר העולם. לגגות ירוקים מיוחסים יתרונות רבים (אם כי לא תמיד יש בסיס מוצק לכל הטענות):



גגות ירוקים (המשך)

אשר קיומם בעיר היה מצטמצם מאוד ללא אזורי מחייה מתאימים.

תרומה לתפקוד הבניין

תפקוד תרמי - התקנת גג ירוק יוצרת סביבה מורכבת מאוד מבחינת תהליכי מעבר האנרגיה. איור אא מדגים את היחסים ההדדיים בין הצמחייה, התשתית, הגג הנושא והסביבה.

• קרינת השמש נבלעת בעלים או בתשתית

• מתקיימים חילופי קרינה ארוכת גלים בין חופת הצמחייה לבין השמיים, בין הצמחייה לבין התשתית ובין העלים לבין עצמם

• אידוי-דיות (evapotranspiration) מתרחש בעלים

• על פני התשתית מתרחש אידוי מים הנמצאים בתשתית. לעתים רחוקות יתרחש גם עיבוי (טל).

• חילופי חום מתרחשים בהסעה בין עלי הצמחייה לבין האוויר שמעליהם וביניהם, וכן בין הפנים העליונים של התשתית לבין האוויר שמעליה.

• מעבר חום ומסה (אדי מים) בין התשתית לבין האוויר שמעל הגג.

ניתוח ההשפעה הכוללת של כל התהליכים האלה ממחיש כי התרומה העיקרית של הגג הירוק להתנהגות התרמית של הבניין היא בכך שהוא מצל על הגג הנושא. לאידוי המים - מן הקרקע או מן הצמחים - ישנה השפעה משנית. בכל מקרה, הטמפרטורה של התשתית איננה נמוכה מטמפרטורת האוויר הרצויה בקיץ, בכל אזורי הארץ לרבות במישור החוף. לכן לא ניתן להתייחס לגג ירוק כאל מערכת קירור.

חשוב לציין גם כי הדרישה לבידוד תרמי של גגות בניינים בישראל נובעת במידה רבה מן הצורך להקטין את איבוד החום בחורף. מאחר ותרומתו

של גג ירוק להתנגדות התרמית הכוללת היא קטנה מאוד, ונופלת בהרבה מן הבידוד הנדרש אפילו באזור החוף - חיוני לבדוד את הגג כראוי בלי קשר לתרומתו של הגג הירוק. התקנת בידוד תרמי מתחת לתשתית הצמיחה - אפילו שכבה של 2-3 ס"מ קלקר - הופכת את התרומה של הגג לתפקוד התרמי של הבניין לשיקול שולי בהשוואה לשאר השיקולים בנוגע להתקנת גג כזה בישראל.

תפקוד אקוסטי - גגות ירוקים עשויים להפחית את מעבר הקול דרך התקרה העליונה של הבניין. התשתית (קרקע) בולעת את התדרים הנמוכים, בעוד שהצמחים עשויים לבלוע חלק מן התדרים הגבוהים. (עם זאת, חשוב להזכיר שעיקר הרעש חודר לבניין דרך החלונות - מבעד לזיגוג עצמו ומבעד לסדקים בין כנף החלון לבין המסגרת.)

הגנה על שכבת האיטום - בגגות שטוחים (שלא כמו בגגות משופעים), יש צורך בשכבת איטום על מנת למנוע חדירת מים למבנה. שכבות האיטום המקובלות בארץ כוללות יריעות (ביטומניות, PVC) וחומרים המיושמים בהברשה או התזה. כל החומרים נפגעים במשך הזמן כתוצאה מן החשיפה לסביבה, בשל הפרשי הטמפרטורות הגדולים ובעיקר עקב ההשפעה המזיקה של קרינת השמש. התקנה של גג ירוק - בדומה לגג ההפוך - מגינה על שכבת האיטום ומאריכה את חייה. עם זאת,



במונחים כספיים, אלא חומרי גלם (תוספת בטון ופלדה) אשר יש בהם אנרגיה אצורה ניכרת – ולכן גם פגיעה משמעותית בסביבה.

צריכת מים - ברוב ארצות העולם, גג ירוק יכול להתקיים כל השנה ללא השקיה. באקלים הארץ, לעומת זאת, שבו שיעור האידוי השנתי עולה במידה רבה מאוד על כמות המשקעים אפילו בצפון, גג ירוק לא יכול להתקיים ללא השקיה. גם צמחים חסכוניים במים, כגון זיפנוצה חבויה (דשא קיקיוו), אפטינה לבובה, סובובים ומלוחית הרגלה דורשים השקיה בכמות של 3-8 ליטר למ"ר ביום בחודשי הקיץ באזור החוף הלה, ואף יותר מכך באזורי הארץ האחרים.^[71] כאשר עובי התשתית קטן (10-20 ס"מ), מצטברים בה בהדרגה מלחים הנמצאים במי ההשקיה, כך שיש צורך להביא בחשבון החלפה תקופתית של המצע או נטיעת צמחייה המתאימה לקרקעות מליחות. לבסוף, יש להביא בחשבון את יכולתם של הצמחים לשרוד תקופות ממושכות יחסית ללא השקיה. כאשר מביאים בחשבון את כל הדרישות האלה, במקביל לתועלת המתקבלת מן ההגנה על הגג, נמצא כי האפטינה, שלה עלווה בשרנית בצבע ירוק עז ופרחים אדומים, היא הצמח המתאים ביותר לגגות אקסטנסיביים בישראל. חשוב להדגיש, עם זאת, כי גם האפטינה צורכת מים לא מועטים, וכי יישום בקנה מידה רחב של גגות ירוקים על בניינים בכל הארץ יגדיל את הביקוש למים במידה משמעותית. – דוקא בתקופה שבה המחסור במים נעשה מוחשי מתמיד.

גגות ירוקים (המשך)

במידה ומתגלה פגיעה בשכבת האיטום בגג ירוק – קשה יותר לאתר אותה ולתקן אותה. כמו כן, יש להבטיח כי שורשי הצמחייה לא יפגעו באיטום, על ידי התקנת הפרדה מתאימה.

השהית נגר עילי ומיתון ספיקות שיא בזמן גשם

כאשר יורד גשם, חלק מן המים הופך לנגר עילי וחלק נספג בקרקע או נספח לעלים בצמחייה. בשטח עירוני, שיעור הנגר העילי עלול להיות גדול מאוד, משום שרוב המשטחים אטומים. לכן, כאשר יורד גשם חזק, רוב המים הופך לנגר עילי, וזרימות חזקות עלולות להתפתח על פני השטח, עד כדי היווצרות שטפונות. כאשר הגג מכוסה צמחייה, הוא מעכב את ניקוז המים אל המערכות העירוניות ומקטין את ספיקות השיא.

עם זאת, חשוב לציין כי המים הנאגרים בתשתית הגג הירוק אמנם עשויים לשמש להשקיית הצמחייה עליו – אך נגרעים מפוטנציאל מי הגשם הכולל של המדינה. זאת משום שהם מתאדים על פני הגג במהלך הזמן, בעוד שאת המים הנאספים קרוב לקרקע ניתן להפנות לאגירה בתת הקרקע, שם הם נוספים למי התהום הזמינים של המדינה.

חסרונות של גג ירוק

לגגות ירוקים יתרונות רבים, אולם בצידם ישנם גם מספר חסרונות.

עומס סטטי על גג הבניין - לתשתית הצמיחה ואפילו לצמחים עצמם ישנו משקל, המתווסף לעומס הסטטי על קונסטרוקציית הבניין. כאשר מדובר בגג אקסטנסיבי, העומס הזה איננו גדול מאוד – כ-300 ק"ג למ"ק של תערובת שתילה קלה, שהם כ-30 ק"ג למ"ר בלבד עבור שכבה בעובי של 10 ס"מ. עם זאת, חשוב לזכור כי כאשר התערובת רוויה מים, משקלה המרחבי עולה ל-1100 ק"ג למ"ק או יותר – עומס לא זניח.

כאשר מדובר בגג אינטנסיבי, אין ספק כי יש צורך בחיזוק משמעותי של קונסטרוקציית המבנה. לחיזוק הזה יש עלות ניכרת, הנמדדת לא רק

71. Schweitzer et al., 2010



איור 22.1 – חומרי גמר אופייניים
(לקירות חוץ: א) טיח חלק צבוע, ב)
טיח בעל טקסטורה וגסה ("שפריץ"),
ג) בטון גלוי, ד) ציפוי אבן מסותתת.

(albedo). חומרים בהירים וחלקים מאוד מאופיינים בערכי אלבדו גבוהים, וחומרים אלה עלולים ליצור בוחק ואי-נוחות ויזואלית בקרבת הבניין. לעומת זאת, חומרים בעלי אלבדו נמוך מאוד שחשופים לקרינת שמש חזקה מתחממים ופולטים קרינה ארוכת-גלים בעוצמה גבוהה, דבר שעלול לגרום גם הוא לאי-נוחות בקרבת הבניין.

פליטת קרינה ארוכת-גלים מהמשטח מושפעת גם ממקדם הפליטה ("אמיסיביות") של חומרי הגמר. ברוב המקרים ההבדל בערך המקדם בין חומר אחד לשני הוא קטן (ונע בסביבות 0.9, כפי שרואים בטבלה 6.1). עבור חומרים חריגים, כגון מתכות, ערך המקדם נמוך בהרבה (לפח מגולוון יש אמיסיביות של 0.3 בלבד). לכן השימוש בפח עלול ליצור "מלכודת חום" – כאשר קרינת השמש נבלעת בחומר והחום שנוצר לא נפלט בקלות, אלא מועבר פנימה בהולכה לתוך הבניין.

תכונות מכניות ועמידות – בנוסף לתפקידיהם היוזאלי והאנרגטי, חומרי הגמר מקנים לבניין הגנה בפני פגיעה מכאנית, רטיבות, והדרדרות פיזית. לעמידות החומרים

בקירות רב-שכבתיים ובגג מגן יש חשיבות אקלימית לא רק לשכבות העיקריות של **מסה תרמית** פנימית וחומרי **בידוד**, אלא גם לגימור החצוני...

22. חומרי גמר

כיצד יכולה הבחירה של חומרי הגמר לתרום לתפקוד האקלימי ואנרגטי של הבניין?

* * *

חומרי הגמר יוצרים את הממשק הישיר בין מעטפת הבניין והסביבה. בהתאם לכך, בחירתם מושפעת ממספר תכונות חשובות.

תכונות אופטיות ותרמיות – הצבעים ורמת החספוס של חומרי החזיתות קובעים במידה רבה את המראה החיצוני של הבניין, מבחינה ויזואלית. על פי תכונות אלה נקבע גם מקדם הבליעה של המשטח, אשר מוגדר כחלק היחסי של קרינת השמש הנבלעת בחומר, מתוך סה"כ הקרינה שפוגעת בו.

בטבלה 6.1 בפרק 6 מוצגים ערכי בליעה עבור חומרי גמר נבחרים. ניתן להבחין שככלל, חומרים בעלי גוון כהה בולעים חלק גדול יותר של קרינת השמש, וגוונים בהירים פחות. בנוסף, ככל שחומר בגוון נתון נעשה פחות חלק ויותר מחוספס, כך עולה מקדם הבליעה שלו – עקב ריבוי ההחזרות והבליעות הפנימיות בתוך המרקם של המשטח.

יודגש שכל עליה בבליעה של משטח החשוף לקרינת שמש גורמת להתחממות פני השטח, אשר בתנאים חמים עלולה להגדיל משמעותית את ההולכה של חום פנימה דרך הקיר (בהתאם להתנגדות התרמית שלו). כך אנרגיה, שמקורה קרינת שמש, מועברת בצורת חום אל תוך הבניין.

בהנחה שהחומר אינו שקוף, כל קרינת השמש שלא נבלעת בחומר מוחזרת החוצה, ומקדם ההחזרה של המשטח (המשלים של מקדם הבליעה) מכונה "אלבדו"



איור 22.2. יצירת "עומק החזית" בקני מידה שונים.

טווח ביניים – ארקדות, קולונדות, מרפסות, וחצרות פנימית יוצרים גם חזית עמוקה וגם חלל שימושי נוסף בין פנים וחוץ.

המלצה:

ברוב המקרים בארץ, מומלץ להשתמש בחומרי גמר בהירים יחסית על מנת למתן את עומס החום שנובע מבליעה של קרינת שמש בקיץ. בחורף, המעטפת חשופה לקרינה בעיקר בחזיתו הדרומית – שבה מומלץ למקם חלונות גדולים ככל שאפשר, כך שקליטת האנרגיה לצורך חימום תלויה רק במידה קטנה במקדם הבליעה של הקיר עצמו.

* * *

... גם בפתחים מזוגים ניתן לנצל את היתרונות של חומרי גמר בעלי מקדם בליעה נמוך, תוך שימוש בתריסים ניידים ואלמנטי הצללה אחרים. חשוב ביותר שגמר **הגג העליון** יהיה בהיר, וניתן גם לתת לגג הגנה באמצעות אלמנט מרחף.

יש השלכות גם על שמירת התכונות הנזכרות לעיל, כגון מקדם הבליעה.

לדוגמא: חומר בשימוש רחב בקירות של בנייני מגורים ואחרים בארץ הינו טיח צמנטי, בעל גימור מוחלק וצבוע. בהנחה שגוון הצבע הוא בהיר, המשטח החלק אינו בולע קרינת שמש בשיעור גבוה וכך נמנע התחממות הקיר. עם זאת, המשטח המוחלק נתון לסדיקה (לעיתים בצורה בולטת ביותר) כתוצאה מהתפשטות תרמית, שקיעת יסודות והתיישנות טבעית, והגוון הבהיר עלול להשתנות במשך הזמן – בין היתר כתוצאה מדהייה והדבקות של אבק ופיח. כאשר יש גימור מחוספס (כגון טיח "שפריץ") ההצטברות של אבק וחומרים מזהמים אף מואצת.

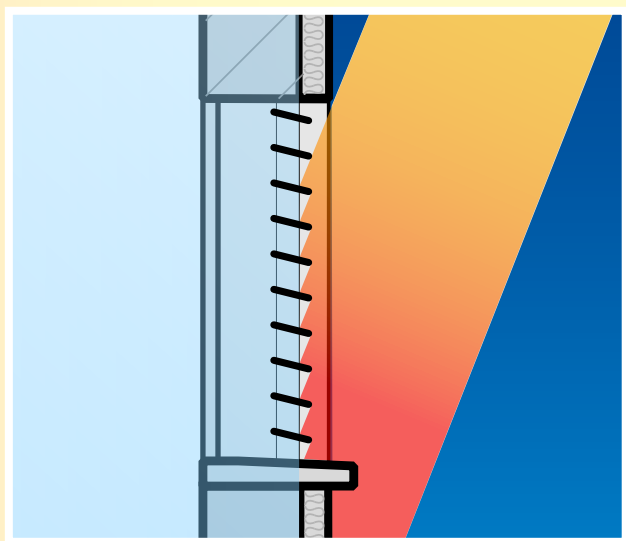
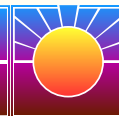
לעומת זאת, קיר עם ציפוי אבן מסותתת מתאפיין במקדם בליעה יותר גבוה – אבל עשוי לשמור על תכונותיו המקוריים לאורך זמן רב. **באיור 22.1** מוצגות מספר דוגמאות של חומרי גמר לקירות בעל תכונות ויזואליות, תרמיות ומכאניות שונות.

"עומק החזית"

ניתן להתייחס לחזית הבניין – ולחומרי הגמר של קירותיו – לא כקרום דו-מימדי, אלא כממשק בעל עומק בכיוון השלישי. "עומק" החזית עשוי לתרום לתפקוד התרמי של המעטפת, כתוצאה מהגדלת פני השטח וסילוק חום בהסעה, ומהצללה הדדית בין "שכבות" החזית. תופעות אלה מקבלות ביטוי בקני מידה שונים (ראה איור 22.2):

מרקם פני השטח – חומר גמר מחוספס (לבנים, אבן, וציפויים אחרים בעלי טקסטורה משמעותית) יוצר כתמי צל קטנים וצפופים (בסדר גודל של מילימטרים עד סנטימטרים בודדים).

בליטות, שקעים, גגונים – יוצרים "עומק" בחזית בסדר גודל של עשרות סנטימטרים עד מטרים בודדים, אבל לא יוצרים חלל ביניים שימושי.



איור 23.1. פתחים יכולים לספק תאורה, אוורור ומבט - תוך בקרה על קרינת השמש שגורמת להתחממות הבניין.

לשיקולים שמנחים את התכנון של **צורת המעטפת** ו**קירות רב-שכתיים** יש משמעות גם לגבי פתחים מזוגגים, אשר שממלאים תפקיד מיוחד בתפקוד הבנין ...

23. פתחים בבנין

בבניינים קיימים מאז ימי קדם פתחים במעטפת החיצונית - בקירות או בגג - אשר משמשים למספר מטרות (איור *1):

- תאורה טבעית
- אוורור
- קשר ויזואלי עם החוץ
- מעבר בין פנים לחוץ

בדרך כלל היו הפתחים ניתנים לסגירה באמצעים שונים, החל מיריעות בד או עורות של בעלי חיים, עבור בתריסי עץ וכלה בחומרי זיגוג. סגירת הפתח דרושה בעיקר על מנת לאפשר בקרה של תנאי אקלים הפנים בבנין.

הפתחים בבנין מהווים את אחד מהאמצעים החשובים ביותר לעיצוב האדריכלי, ולעיתים קרובות גודלם ומיקומם אינו נקבע (בפועל) על פי צורכיהם של דיירי הבנין אלא מטעמים אסתטיים. אף על פי כן, ואולי דוקא בשל כך, יש לפתחים השפעה מכרעת על התפקוד האנרגטי של הבנין.

בבנייה המודרנית הפתחים כמעט תמיד כוללים זיגוג, ולפיכך יעסוק פרק זה בעיקר במערכות זיגוג על רכיביהן השונים.

* * *

1. הגדרה

מערכת זיגוג במעטפת החיצונית של בנין כוללת יחידת זיגוג אחת או יותר, ויכולה לכלול גם מסגרת, פרופילי חלוקה (פרופילים המחלקים את השמשה) ואמצעי הצללה אינטגרלי. יחידת הזיגוג יכולה להיות עשויה זכוכית, פלסטיק או כל חומר אחר שדרכו יכול לעבור אור.

בארץ ובעולם קיים מגוון גדול מאוד של מערכות זיגוג הנבדלות זו מזו באופן ההתקנה שלהן, באופן השימוש בהן ובהשפעתן על צריכת האנרגיה הדרושה לאקלים הבנין, לאוורורו ולהארתו. לא ניתן להגדיר מערכת זיגוג 'אופטימלית' אלא בהקשר של המאפיינים של בנין נתון ושל דפוסי השימוש בו.

2. מעבר אנרגיה דרך מעטפת הבנין

ככלל, רצוי שחלקי המעטפת של הבנין שהם אטומים לאור יתוכננו וייווצרו כך שמעבר האנרגיה דרכם יהיה מזערי. זאת ניתן להשיג באמצעות שילוב מתאים של בידוד תרמי ומסה תרמית בחומרים מהם עשויה המעטפת. פתחי המעטפת, ובפרט מערכות הזיגוג, מיועדים אפוא לאפשר מעבר אנרגיה מבוקר דרך המעטפת - לתאורה, לאוורור או לחימום. המטרה האחרונה - דהיינו חימום - קיבלה בעשורים האחרונים תשומת לב הולכת וגדלה, והיא נדונה בהרחבה במדריך זה בפרק על חימום פסיבי.

מעבר האנרגיה דרך מערכות הזיגוג בבנין מתרחש בהולכה, כמו דרך המעטפת הקבועה והאטומה, אך גם



• העברות אור (VT - visible transmissivity): החלק היחסי מקרינת השמש בתחום הנראה לבני אדם העובר דרך הזיגוג. הסימון יכול להופיע באחוזים או כשבר עשרוני.

• מקדם רווח חום סולרי (solar heat gain coefficient - SHGC): היחס בין רווח החום הסולרי ליחידת שטח של הזיגוג כתוצאה מפגיעת קרינת השמש בה, לבין שטף הקרינה הפוגעת.

הערות:

1. בחישוב רווח החום הסולרי מביאים בחשבון לא רק את ההעברות (transmissivity) של הזיגוג אלא גם את קרינת השמש הנבלעת בשמשה, מחממת אותה ואח"כ נפלטת לתוך הבניין בצורת קרינה אינפרא אדומה או בהסעה.

2. הנתונים אשר מספקים היצרנים הם עבור קרינה הפוגעת בניצב למישור הזיגוג. עם שינוי זווית הפגיעה משתנה היחס בין ההחזרה לבליעה ולהעברה. בזווית פגיעה של כ-60° יעלה מקדם ההחזרה (R) לערך של כמעט 1, וכמעט כל הקרינה שתפגע בזיגוג תוחזר ממנו.

3. בעבר היה נהוג לסמן את רווח החום דרך שמשה באמצעות 'מקדם ההצללה' (SC - shading coefficient), שהוא היחס בין רווח החום הסולרי ליחידת שטח של הזיגוג כתוצאה מפגיעת קרינת השמש בה לבין רווח החום המתקבל בשמשת ייחוס בעובי 3 מ"מ. ניתן להמיר את מקדם ההצללה למקדם רווח חום סולרי של שמשה על ידי מכפלה בערך 0.87. לדוגמא: מקדם ההצללה של שמשה שקופה בעובי 3 מ"מ מן הסוג שהיה מקובל להתקין ברוב החלונות בבנייני המגורים בארץ הוא '1', אך מקדם רווח החום הסולרי של אותה שמשה הוא 0.87.

• החזרת קרינת שמש (reflectivity): היחס בין קרינת השמש המוחזרת מן השמשה לבין שטף הקרינה הפוגעת. חלק מן היצרנים מסמנים בנפרד את ההחזרה עבור כל אחד מצידי השמשה (פנימי או חיצוני), במיוחד כאשר על הזיגוג קיים ציפוי מיוחד, כגון ציפוי בעל פליטות נמוכה (low-e).

• מקדם הבליעה של הזיגוג (absorptivity): היחס

בקרינה - משום שחומר הזיגוג הוא שקוף (במידה כזו או אחרת), וגם בהסעה - משום שלרוב מערכת הזיגוג איננה אטומה לגמרי למעבר אוויר, גם כאשר היא סגורה.

פתח יכול להיות נטל או נכס, כתלות בשלושה גורמים אשר לכולם השפעה מכרעת על מידת התועלת שהפתח מביא בפועל:

א. תכנון מתאים

ב. ייצור והרכבה ברמה נאותה

ג. תפעול נכון של הדייר

די בכך שאחד מן הגורמים בשרשרת אינו ממלא את תפקידו כראוי בכדי להביא לכך שהפתח לא ימלא את יעודו בבניין.

יחידת הזיגוג מהווה את החלק העיקרי במערכת הזיגוג, אולם בנוסף אליה עשויים להיות גם מסגרת ומערכת הצללה.

3. יחידת הזיגוג

יחידת הזיגוג מיועדת בראש ובראשונה להחדיר אור לבניין. לרוב, אם כי לא תמיד, היא מאפשרת גם מבט החוצה בעדה. הזיגוג מותקן בדרך כלל בצורת לוח שטוח אשר עוביו דק מאוד, המכונה שמשה, אך הוא עשוי להיות גם רכיב בעל ממדים שונים לגמרי, כגון לבני זכוכית. לסוג הזיגוג ישנה השפעה מכרעת על מעבר החום בהולכה ובקרינה, ולפיכך על תפקוד מערכת הזיגוג כולה.

3.1 השפעת הזיגוג על מעבר אנרגיה בקרינה

כאשר קרינה פוגעת בשמשה, חלקה עובר דרך הזיגוג, חלקה מוחזר ממנו וחלקה נבלע בו. עד לפני שנים לא רבות, היו השמשות במערכות הזיגוג הנפוצות 'שקופות'. כלומר, הן יוצרו כך שתהיה להן השפעה מזערית על מעבר קרינת השמש, ובפרט על מעבר אור (נראה). היום, ניתן להזמין יחידות זיגוג אשר כוללות שמשות המעבירות רק חלק מקרינת השמש: היתרה נבלעת בשמשה או מוחזרת ממנה.

3.2 סימון התכונות של יחידות הזיגוג

תכונות יחידות הזיגוג נתונות על ידי היצרן. הסימון המקובל כולל את התכונות הבאות:



איור 23.2. סינוור מחדירת שמש ישירה (למעלה) ומבהיקות גבוהה של הרקע (למטה).

הועדה הבינלאומית למאור (CIE) מגדירה סינוור כ"מצב אשר בו יש חוסר-נוחות בראייה או הפחתה ביכולת לראות עצמים או פרטים, הנוצר כתוצאה מבהיקות (luminance) בתחום לא מתאים או בפילוג מרחבי לא נוח, או כתוצאה מניגודים קיצוניים בשדה הראייה".

הסינוור יכול להיגרם על ידי חדירה של קרינת שמש ישירה אל העיניים, אך גם כאשר השמש יוצרת כתמים בהירים מאוד באזור בו מתבוננים (במרכז שדה הראייה) כגון שולחן עבודה, מסך מחשב או ספר שבו קוראים (איור 23.2 למעלה). עם זאת, סינוור יכול להיגרם גם ללא חדירת קרינת שמש ישירה, כאשר חלק משדה הראייה בהיר מאוד בהשוואה לשאר הרקע – כמו בדוגמא הנראית איור 23.2 למטה.

לסינוור ישנם שני ביטויים עיקריים:

- סינוור ליקוי (disability glare) – סינוור המביא להפחתה ביכולת להבחין בפרטים, אם כי לא בהכרח כרוך באי-נוחות. למשל, החזרים מנייר לבן מבריק

בין קרינת השמש הנבלעת בשמשה לבין שטף הקרינה הפוגעת.

- מוליכות תרמית (U-value - thermal transmittance): מעבר חום ליחידת זמן דרך יחידת שטח של הזיגוג ושכבות הגבול של האוויר הנמצא במגע איתו, כתוצאה מהפרש טמפרטורות של מעלה אחת בין הסביבות שבשני צידי המערכת. הסימון נעשה ביחידות של וואט/מ"ר קלווין.

4. תכנון מערכות הזיגוג

לא ניתן להמליץ על זיגוג מסוים כ"זיגוג אידיאלי", משום שבחירת חומר הזיגוג תלויה בשיקולים רבים, כגון מבט אל הנוף, תאורת יום או שיקולי עיצוב. לכל מערכת זיגוג יתרונות וחסרונות, ויש לשקול כל מקרה לגופו.

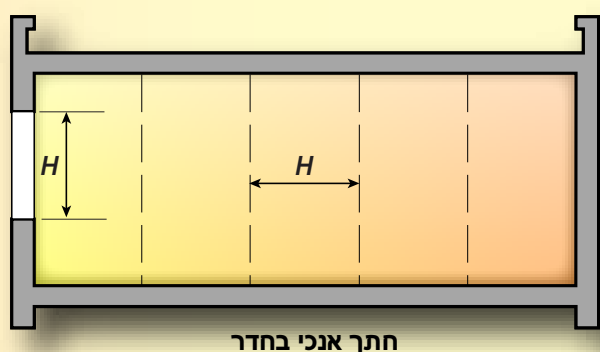
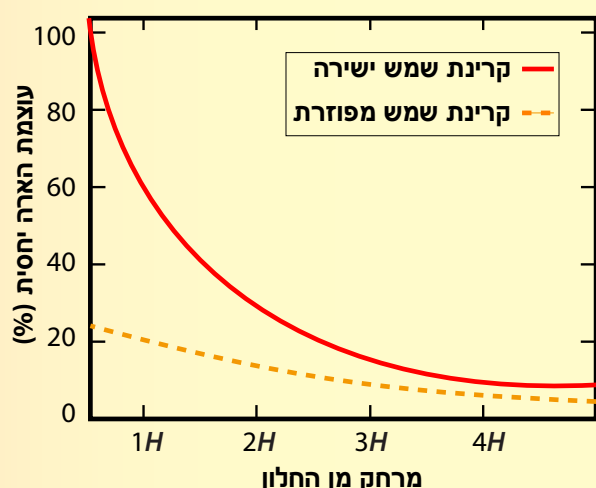
תכנון מערכות הזיגוג חייב להביא בחשבון את השפעתן המורכבת על הבניין ועל השוהים בו. אם מערכת הזיגוג לא תאפשר נוחות ויזואלית ותרמית של דיירי הבניין, עלולים אלה לנקוט בצעדים אשר משמעותם ניטרול התועלת שבה. כאשר הזיגוג חסום על ידי אמצעי הצללה – תקנים או מאולתרים – האפשרות לנצל את קרינת השמש לתאורה טבעית או לחימום פסיבי נפגעת.

במערכת זיגוג יעילה קיימת הפרדה בין חלקיה השונים, בהתאם לתפקודם: חלק ממנה עשוי להיות מיועד לתאורה טבעית, חלק לחימום פסיבי, וחלק שלישי לאוורור. כל אחד מחלקי המערכת בחלל נתון עשוי להיות בעל מאפיינים שונים, כגון גודל, מיקום, סוג זיגוג, פתיחה וכיו"ב.

בדרך כלל לא ניתן לשלב את כל התפקודים ביחידת זיגוג אחת!

4.1 תאורה טבעית

נוחות וויזואלית תלויה הן בכמות האור והן באיכותו. מניעת סינוור הינה חיונית: חלל עם עצמת הארה (illuminance) מספקת המושגת בעזרת אור טבעי אך עם סינוור לא יאפשר תפקוד יעיל, ולכן סביר להניח שבחלל כזה תדרש האפלת החלונות והפעלת תאורה מלאכותית.



איור 23.3. עוצמת ההארה פוחתת במהירות כאשר מתרחקים מן החלון.

ראשית, משום שמחקרים רבים מראים כי דוקא השינויים בתאורה הטבעית, החלים למעשה כמעט ללא הרף במהלך היום, תורמים לתחושת הרווחה ולבריאות שלנו ומגדילים את פריון העבודה. אור טבעי – בתנאי שניתן לבקר את העוצמה שלו – הוא כמעט תמיד עדיף על תאורה מלאכותית.

ושנית, משום שחלקה של התאורה החשמלית בהוצאות האנרגיה הישירות והעקיפות של בניין עשוי לנוע בין כ-10 אחוזים בבנייני מגורים ועד ל-40 אחוזים או יותר בבנייני משרדים. כלומר, ניצול יעיל של תאורה טבעית עשוי להביא לחיסכון ניכר בהוצאות התפעול השוטפות, בעיקר במשרדים.

תכנון נכון של התאורה הטבעית אינו רק חוסך בעלות הישירה של החשמל לתאורה, אלא עשוי להביא לחיסכון גם בעלויות מיזוג האוויר, משום שהיעילות האורית של אור השמש גבוהה מזו של רוב מקורות האור החשמליים. כלומר, עומס החום על הבניין הנוצר

עלולים להפריע בקריאה; השתקפויות על גבי מסך מחשב או על גבי מסך טלביזיה מפריעות לראות את התצוגה.

• סינוור טורד (discomfort glare) – גם כאשר אין הפחתה ניכרת ביכולת להבחין בפרטים, המצאותם של מוקדי אור בוהקים מאוד בשדה הראייה גורמים לאי-נוחות.

תקן ישראלי ת"י 8995 – "תאורה למקומות עבודה שבתוך מבנים" (שהוא למעשה אימוץ של התקן הבינלאומי ISO 8995) קובע עוצמות הארה נדרשות למקומות עבודה בעלי מאפיינים שונים, כגון משרדים או בנייני חינוך, ובמקביל קובע גם מגבלות ביחס למידת הסינוור (באמצעות דירוג הסינוור המאוחד – UGR) ולאיכות העברת הצבע. עוצמות ההארה הנדרשות נעות בין 50 לוקס ל-1000 לוקס, אך בדרך כלל הערך הנדרש הוא 300 או 500 לוקס.

הקושי שבהשגת ערכים אלו באמצעות תאורת יום בלבד נובע ממספר סיבות:

א. עוצמת ההארה על משטח אופקי בחוץ עשויה להיות 100,000 לוקס או יותר – כלומר פי 100 או יותר מן הנדרש בתוך הבניין.

ב. שטף קרינת השמש הפוגע בחלונות בכיוונים השונים איננו אחיד, ולפיכך עוצמת ההארה אשר תתקבל באמצעות חלון בגודל נתון שונה מחזית לחזית של הבניין.

ג. שטף קרינת השמש המתקבל על קיר נתון משתנה בהתאם לעונות השנה, לשעות היממה ולתנאי מזג האוויר.

ד. עוצמת ההארה הטבעית בחלל הבניין יורדת ביחס ישר לריבוע המרחק מן החלון, בהתייחס לגובה הפתח (המרחק מן הסף למשקוף). ראו איור 23.3.

קל לראות שלא ניתן להשיג תאורה טבעית יעילה כאשר כל החלונות בבניין, ללא תלות בחזית בה הם ממוקמים ובתכנון החלל הפנימי דומים בגודלם, במיקומם ובאופן ההצללה עליהם.

מדוע כדאי אפוא להתאמץ בכדי להשיג תאורה טבעית, במקום להסתפק בתאורה מלאכותית (חשמלית)?



מקור האור	יעילות אורית (לומן/ואט)
אור שמש (תלוי בזווית מעל האופק)	90-120
אור הרקיע (שמיים בהירים, תלוי בשעות היום)	125-150
נורות ליבון	13-15
נורות הלוגן	15-22
נורות LED (אור לבן)	25-70
נורות	45-70
נורות פלואורוצנט קומפקטיות	45-75
נורות פלואורוצנט לינאריות עם משנק אלקטרוני	70-100

טבלה 23.1. היעילות האורית של אור יום ושל מקורות אור חשמליים שונים.

(כ-70 עד 80 ס"מ מן הרצפה). לעומת זאת, כאשר גובה החלון נמוך יותר, עוצמת ההארה בסמוך לקיר החיצוני גבוהה ביותר, במיוחד אם חודרת מבעד לזיגוג קרינת שמש ישירה. במקרה כזה, עוצמת ההארה על משטח העבודה עלולה להגיע ל-50,000 לוקס או יותר (כלומר, בערך פי 100 מן העוצמה הרצויה).

4.1.2 אמצעים להכוונת האור

כיוון של קרני השמש הפוגעות בשמשה איננו בהכרח הכיוון הרצוי לנו. למעשה, כמעט תמיד רצוי לכוון את הקרינה אל התקרה, וכתוצאה מכך לקבל באזור הפעיל אור רך ומפוזר במקום קרינת שמש ישירה. לשם כך

עקב קליטה של כמות אור יום נתונה קטן מזה הנוצר על ידי הפקת אותה כמות אור באמצעות נורות חשמליות.

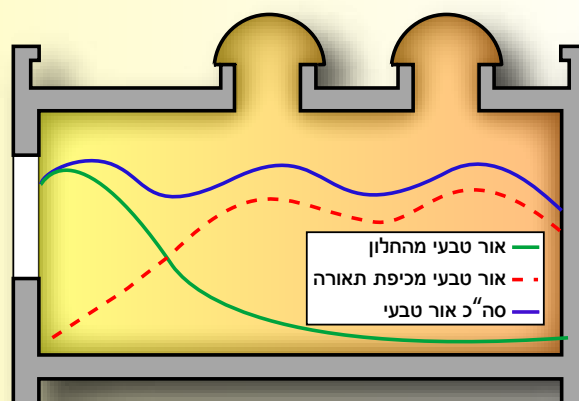
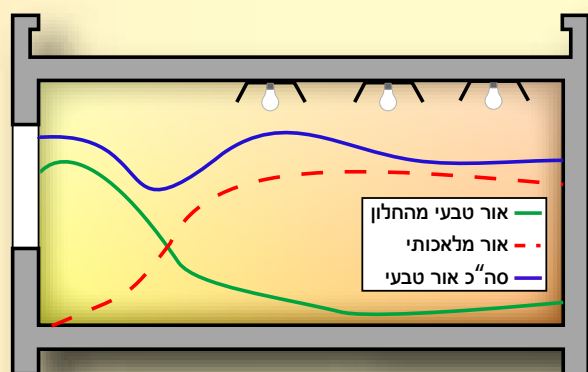
עם זאת, מן הראוי לציין כי בדרך כלל עוצמת ההארה הטבעית המתקבלת באמצעות החלונות גבוהה מן הנדרש, ביחוד סמוך לקיר החיצוני, ולכן נוצר עומס מיותר על מערכות מיזוג האוויר.

תאורה אחידה יותר בחלל יכולה להתקבל על ידי שילוב מתאים של מקורות אור נוספים (מלבד החלונות בקירות החיצוניים), במיוחד במקומות הרחוקים יחסית מהפתחים האלה. תוספת זו יכולה להתבצע על ידי תאורה טבעית נוספת (למשל באמצעות פתחי תאורה בתקרה בקומה העליונה) או

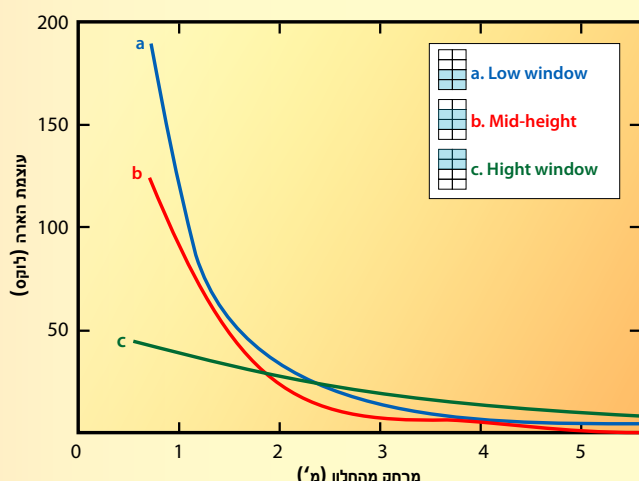
על ידי תאורה מלאכותית (איור 23.4). חשוב מאוד שהבקרה על אמצעי התאורה המלאכותיים תאפשר הפעלה נפרדת של גופי התאורה באזורים הפנימיים השונים בהתאם לעוצמת התאורה הנמדדת על גבי משטח העבודה, בדרך כלל כתלות במרחק מן החלון.

4.1.1 מיקום החלון

למיקום החלון בקיר החיצוני של החדר, ובעיקר לגובהו מעל הרצפה, ישנה השפעה מכרעת על התפלגות התאורה הטבעית בחלל הפנימי. כפי שמראה איור 23.5, חלון הממוקם קרוב לתקרה יוצר התפלגות כמעט אחידה של התאורה בגובה משטח העבודה



איור 23.4. בכדי לקבל תאורה אחידה בחלל, דרושים מקורות אור נוספים מלבד החלונות הקבועים בקיר החיצוני.



איור 23.5. השפעת גובה החלון על פיזור ההארה בחדר.

קמור (כלפי מעלה) בשל יכולתו לפזר אור לשטח רחב יותר של התקרה, ובכך לאפשר תאורה טבעית אחידה יותר במשרד. תכנון מדפי אור גם בחוץ וגם בפנים הינו הפתרון האידיאלי, ויאפשר את התרומה המרבית. מומלץ כי גימור מדפי האור יהיה בעל צבע בהיר ורפלקטבי בכדי לאפשר החזרה מרבית. לצורך החזר אור מיטבי יש צורך בניקיון של המדפים. מומלץ לשקול את המשכיות מדפי האור מעבר לרוחב הפתח בכדי לאפשר הצללה וצמצום הסנוור בשעות בהן קרינת השמש מגיעה לחלון בזווית נמוכה (כגון בבוקר ואחה"צ).

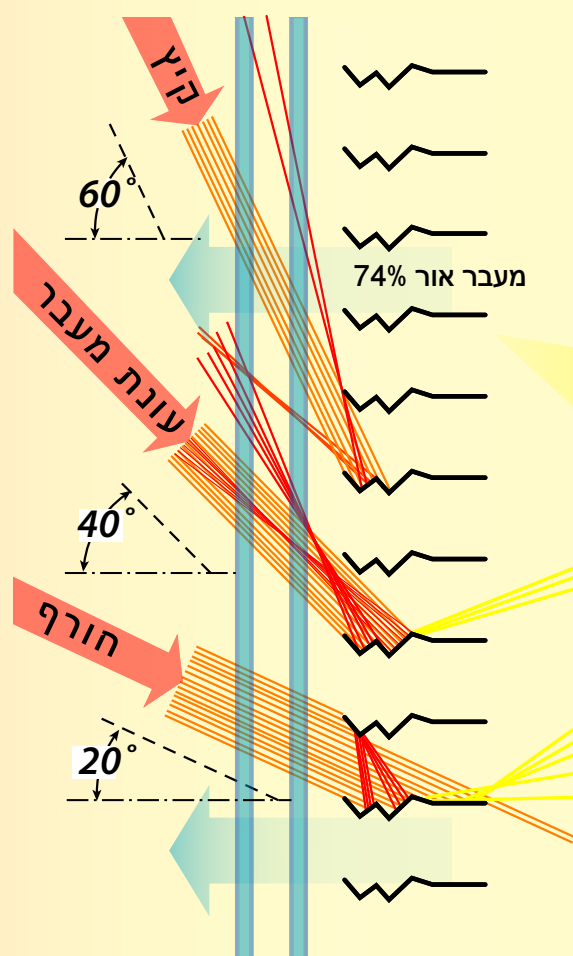
כאשר לא ניתן להתקין מדף אור, אך גם בשילוב עם התקן זה, ניתן לשפר את פיזור האור בחלל באמצעות תריסים פנימיים הניתנים לכיוון, כגון רפפות אנכיות או רפפות אופקיות (תריסים ונציאניים). לתריסים תפקיד כפול: הצללה של השמשה כאשר פוגעת בה

ניתן להיעזר באמצעים שונים, אשר אותם ניתן לסווג לשתי קבוצות: אמצעים קבועים ואמצעים ניתנים לכיוון. יתרונם של האמצעים הקבועים הוא בכך שאינם דורשים תשומת לב מדיירי הבניין, ובכך שמלבד ניקיון תקופתי הם אינם דורשים תחזוקה ואינם מתקלקלים. כל האמצעים הניתנים לכיוון נותנים מענה לתנאי תאורה משתנים ולצרכים השונים של הדיירים, אבל אינם נותנים מענה מספק ללא התערבות הדיירים, נוטים להתקלקל ודורשים ניקיון ותחזוקה.

אמצעי קבוע פשוט אשר מתאים ליישום כאשר החלון הוא גבוה (קרוב לתקרה) הינו מדף אור (איור 23.6). מדף אור ניתן להתקין מחוץ למישור הזכוכית, בתוך החלל או בשני צדדי החלון גם יחד. המדף החיצוני משמש להצללת הפתח התחתון ולניתוב אור לתקרת המשרד מקרינת שמש אשר ללא קיום המדף הייתה מגיעה לפתח התחתון (איור 23.7). ישנו יתרון מסוים למדף חיצוני אשר צדו החיצוני נוטה מעט מעלה בכדי לכוון את החזר האור לעומק תקרת המשרד (במיוחד בשעות בהן זוויות השמש הינן באמצע גובה הרקיע). ישנו יתרון גם למדף בעל פרופיל קעור (כלפי מעלה) בשל יכולתו לרכז את החזר קרינת השמש דרך הפתח לעומק תקרת המשרד. המדף הפנימי מונע מקרינת השמש הישירה המגיעה מהפתח העליון להגיע לסביבת העבודה ובכך מקטין את ההסתברות לסנוור ומפחית את עומס חום על השהים בחדר (איור 23.7). בד"כ עומק מדף זה אינו מאפשר מניעה מלאה של חדירת קרינת השמש כאשר זוויות השמש נמוכות, ולכן נדרשים אלמנטי הצללה וניתוב אור גם בצמוד לפתח העליון. ישנו יתרון מסוים למדף פנימי בעל פרופיל



איור 23.6. מדף אור פנימי בחדר ישיבות. מבעד לחלון ניתן להבחין גם במדף חיצוני.



איור 23.8. תריס ונציאני עם פרופיל משוכלל.

בלבד. מאידך, התקנת שמשות בעלת מעבר אור של פחות מ-20%, אשר יבטל כמעט לחלוטין את תחושת הסינוור, כרוך באובדן כמעט מוחלט של הפוטנציאל לתאורה טבעית.

המלצה: חלון המשמש לתאורה טבעית (כגון חלון מעל מדף אור) יהיה בעל מעבר אור גבוה ככל האפשר – לפחות 60%. חלון המיועד בעיקר למבט החוצה יהיה בעל מעבר אור של 30-50% בלבד, ויצויד במערכת הצללה ניתנת לכיוון.

זיגוג 'חס': שימור אנרגיה בבניין

באזורים קרים, כאשר דרוש חימום בחלק ניכר מן השנה, החלונות מהווים נקודת תורפה משמעותית במעטפת הבניין, אשר דרכה עלול להתרחש איבוד אנרגיה רב. לפיכך, מערכות זיגוג באזורים אלו צריכות להיות בעלות מוליכות תרמית נמוכה ככל האפשר.

קרינת שמש ישירה, והכוונת קרינת השמש לעומק החלל.

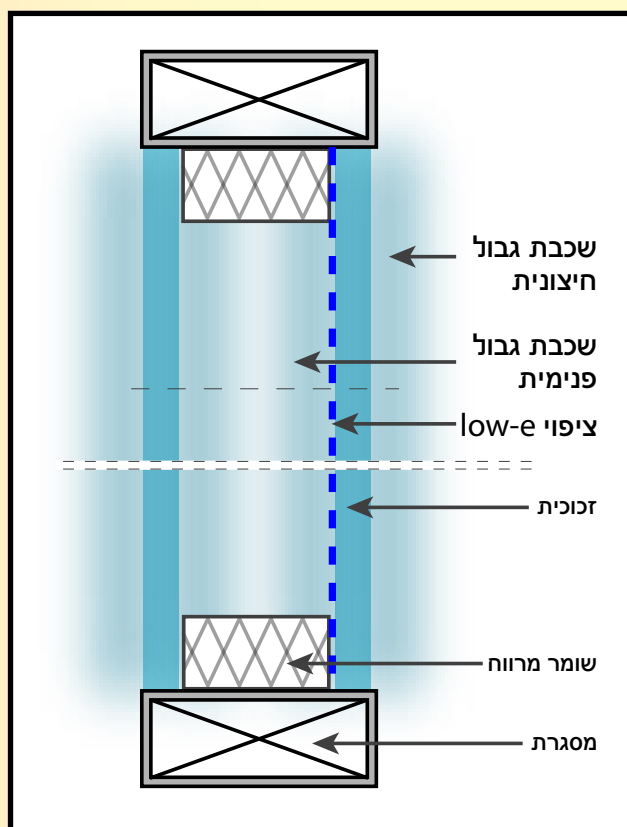
הפרופיל המסורתי של התריסים הוונציאניים הוא קמור (אם הם עשויים מתכת דקה) או שטוח (אם הם עשויים עץ). עם זאת, ניתן להיעזר בפרופילים משוכללים יותר הנותנים מענה חלקי לפגיעת קרינת שמש בזוויות שונות, בהתאם לעונות השנה. דוגמה לפרופיל משוכלל ניתן לראות באיור 23.8).

4.1.3 בחירת יחידת הזיגוג

יחידת זיגוג יכולה להיות מורכבת משמשה אחת או ממספר שמשות, בהרכבים שונים. עד לאמצע המאה העשרים, עיקר השיפור בשמשות לבניין התבטא באפשרות לייצר יחידות זכוכית שטוחות בממדים הולכים וגדלים ובעלות שקיפות רבה ככל האפשר, ללא עיוותים וללא פגיעה בהעברת הצבע. ההתפתחויות בטכנולוגית ייצור הזכוכית בשנים האחרונות הולידו מוצרים אשר שינו לחלוטין את ההתייחסות לזכוכית כרכיב מעטפת בבניין. כיום ניתן לקבל שמשות בעלות תכונות אופטיות שונות, ולהרכיב באמצעותן מערכות זיגוג משוכללות בהתאם לצרכים. עם זאת, הידע הנדרש על מנת לאפיין מערכת זיגוג מתאימה הוא רב יותר. מאחר והנטייה בשנים האחרונות היתה להגדיל את השימוש בזכוכית כאלמנט מעטפת, ישנה חשיבות רבה בבחירה של מערכת מתאימה.

העברת אור

טעות נפוצה בקרב המתכננים היא ההנחה שבכדי למנוע סינוור, די בהתקנת מערכת זיגוג הכוללת שמשה עם זכוכית מגוונת הבולעת חלק ניכר מקרינת השמש הפוגעת בה. זאת משום שהפחתה אחידה של עוצמת ההארה על המשטחים השונים בחדר איננה משנה את הניגודים בבהיקות שלהם. מאחר והעין האנושית מסוגלת להתאים את עצמה לרמות אור שונות, כל עוד הבהיקות המוחלטת איננה יורדת לערכים מאוד נמוכים, עלולים הניגודים בין משטחים בהירים לבין משטחים כהים יותר לגרום להיעדר נוחות ויזואלית. בסדרת ניסויים אשר נערכה בארץ בימים שטופי שמש, לא נמצא כמעט הבדל בתגובות הנבדקים ביחס לסינוור בסביבת העבודה כאשר שמשה שקופה הוחלפה עם שמשה בעלת מעבר אור של 50%



איור 23.9. מעבר החום בזיגוג כפול.

החום הסולרי של זיגוג, אולם כיום ניתן למצוא זכוכיות אשר בהן היחס בין מקדם מעבר האור לבין מקדם רווח החום הסולרי (ערך K) עולה בהרבה על 1. למשל, זיגוג בעל מקדם מעבר אור של 0.65 ומקדם רווח חום של 0.45 יתן יחס של 1.44. בזכוכיות הסלקטיביות הטובות ביותר בשוק כיום ניתן לקבל ערכי K הקרובים ל-2.

ישנן שתי שיטות עיקריות להפחית את רווח החום דרך הזיגוג:

1. זיגוג מגוון ('כהה'): סוג זיגוג זה מקטין את מעבר הקרינה דרכו בכך שחלק גדול מהקרינה הפוגעת נבלעת בו. הקרינה הנבלעת גורמת לעליית הטמפרטורה של הזכוכית בצורה ניכרת (זיגוג כזה יכול להגיע בתנאי הארץ לטמפרטורה של 50°C או יותר ביום שטוף שמש). במקרה כזה, הזיגוג עצמו הופך לגוף חימום המקרין חום רב כלפי החלל הפנימי. על מנת להפחית את חימום הבניין, יש למנוע את פליטת החום כלפי פנים באמצעות ציפוי low-e.

2. זכוכית מחזירה ('מראה'): זיגוג בזכוכית מחזירה

מוליכות תרמית נמוכה אפשר לקבל רק באמצעות מערכת זיגוג הכוללת מספר שמשות.

בתנאי הארץ אין צורך במערכת זיגוג בעלת יותר משתי שמשות (זיגוג כפול), אולם רצוי כי באחת השמשות יהיה ציפוי בעל פליטות נמוכה (low-emissivity, או בקיצור ציפוי low-e). ניתן להסתפק בכך שהחלל שבין שתי השמשות יהיה מלא אוויר, ואין צורך במילוי של גז אציל כגון ארגון, בו נהוג להשתמש בארצות קרות מאוד.

תרומתם של הרכיבים השונים להפחתת מעבר החום דרך מערכת הזיגוג מתוארת באיור 23.9.

מאחר ולזכוכית עצמה ישנה מוליכות תרמית גבוהה מאוד, הרי שעיקר ההתנגדות למעבר חום בחלון בעל שמשה אחת מתקבלת משכבות הגבול הנוצרות באוויר הסמוך אליה, בשני צדיה. בזיגוג כפול, ישנן ארבע שכבות גבול, ולא שתיים, ולכן היא מבודדת בערך פי שניים מזיגוג יחיד. לעובי הזכוכית, שהוא קטן מאוד ביחס לעובי הקיר (10-3 מ"מ, בד"כ) השפעה זניחה על ההתנגדות התרמית של מערכת הזיגוג. מאידך, לרוחב מרווח האוויר בין שתי השמשות ישנה חשיבות רבה: הבידוד התרמי המרבי מתקבל כאשר עובי המרווח הוא כ-15 מ"מ. מרווח קטן יותר יביא לירידה ניכרת בהתנגדות התרמית, אך גם הגדלת המרווח תפחית את ערך הבידוד!

תוספת ציפוי low-e על אחת מן השמשות מונע כמעט לחלוטין מעבר חום בקרינה בין השמשות, ומפחית את מעבר החום דרך מערכת הזיגוג לרבע מן הערך המקביל לזכוכית יחידה, בקירוב.

המלצה: באזורים הקרים בארץ, רצוי להתקין זיגוג כפול עם ציפוי low-e, על מנת להפחית את איבוד החום בחורף.

זיגוג 'קריר': הפחתת רווחי חום דרך הזיגוג בבניין

ברוב אזורי הארץ, למעט אזור ההר, עומס החום בקיץ הוא השיקול העיקרי בתכנון האקלימי של הבניין. על מנת להפחית את העומס התרמי על הבניין דרך הזיגוג, יש להתקין זיגוג אשר יאפשר תאורה טבעית נאותה אך יהיה בעל מקדם רווח חום סולרי נמוך ככל האפשר. בעבר היה מתאם גבוה בין מעבר האור ורווח



איור 23.10. זיגוג אלקטרו-כרומי.

הקליטה הישירה ('direct gain') היא אמנם יעילה מאוד מבחינה תרמית, אך יוצרת סינוור בחלל הפנימי וטמפרטורה קורנת גבוהה בקרבת החלון. כל אמצעי ההצללה הקיימים, לרבות מערכות הזיגוג הקריר, נותנות מענה לחסרונות אלה רק במחיר של הפחתת רווחי החום הרצויים לחימום הבניין.

מערכת זיגוג המאפשרת נוחות ויזואלית ותרמית מבלי להפחית את רווח החום הסולרי פותחה בישראל. עיקרון הפעולה של מערכת הזיגוג (איור 23.11) מבוסס על המרת אנרגית שמש קצרת-גל לקרינה ארוכת גל ולחימום האויר. בחורף משמשת האנרגיה הזו לחימום החלל הפנימי הסמוך לחלון, ובקיץ האנרגיה נפלטת לסביבה החיצונית. מערכת הזיגוג מורכבת משתי יחידות: האחת זכוכית שקופה (רגילה או כפולה), המשמשת לאטימת הפתח לאוויר ולמים; השנייה היא זכוכית בעלת מקדם בליעה גבוה במיוחד, בדרך כלל בעלת גוון כהה. המרווח שבין שתי היחידות מאוורר באמצעות פתחים בצד התחתון ובצד העליון של הזכוכית הכהה. שתי היחידות מהוות מערכת אחת, המורכבת בפתח כך שניתן להפנות את הזכוכית הכהה כלפי פנים בחורף וכלפי חוץ בקיץ.

בחורף, המערכת מאפשרת לנצל את קרינת השמש לחימום החלל הפנימי, אך מונעת בובה בקרבת החלון ומקטינה מאוד את הנזק העלול להגרם לריהוט וציוד

ימנע במידה הרבה ביותר את חדירת קרינת השמש אל הבניין. מאחר ורצוי שהזכוכית לא תהיה אטומה לחלוטין (כדי שניתן יהיה לראות דרכה את החוץ ובכדי לקבל מעט אור), גם פניה המחזירים (=המבריקים) לא יחזירו את כל הקרינה הפוגעת בזיגוג, ועדיין תהיה חדירת קרינה בסדר גודל של 10-35%, לפי סוג הזיגוג שנבחר. יש לזכור כי השימוש בזכוכית מראה על פני חזיתות גדולות עלול לגרום מטרד לסביבה, או אף לגרום בעיה בטיחותית של סינוור אם הקרינה חוזרת אל כביש סמוך.

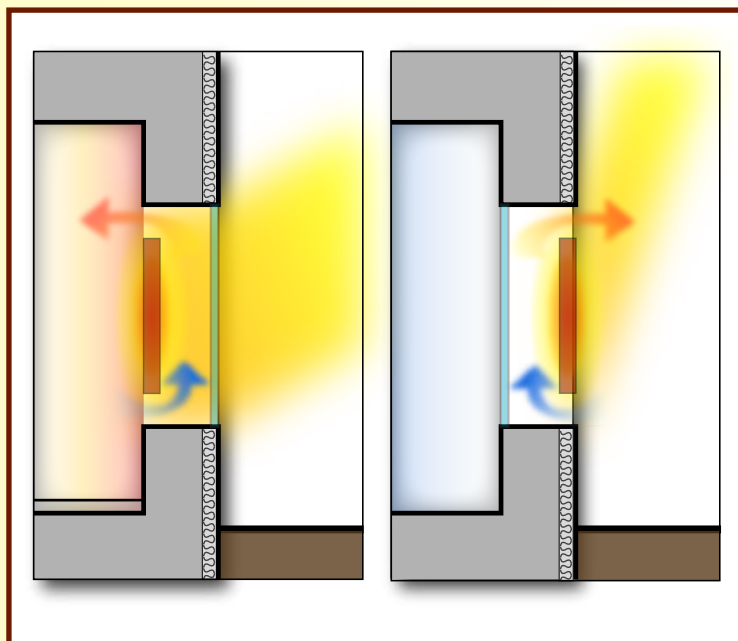
המלצה: ברוב אזורי הארץ מומלץ להתקין מערכות זיגוג בעלות ערך K גבוה ככל האפשר, בעיקר בבניינים אשר בהם ישנם עומסים פנימיים גדולים כגון בניינים למשרדים, תעשייה עילית או מסחר.

זיגוג בעל תכונות משתנות

מאחר ועוצמת הקרינה הפוגעת בחלון משתנה כל העת בהתאם לשעות היממה, עונות השנה ותנאי מזג האוויר, בעוד שבבניין אנחנו מעוניינים בתנאים קבועים, פחות או יותר, עשוי להיות יתרון גדול במערכת זיגוג אשר בנויה כך שהיא מסוגלת לשנות את מעבר האנרגיה דרכה. מערכות זיגוג כאלה עושות את דרכן בהדרגה ממעבדות המחקר אל השוק, ואם כי מחירן עדיין גבוה מאוד, ראוי להתייחס אליהן.

הטכנולוגיה הבשלה ביותר בתחום הזה היא זיגוג אלקטרו-כרומי. זיגוג זה משנה את הגוון שלו בהתאם למצבו של שדה חשמלי המופעל עליו, כך שהוא יכול להיות שקוף כמעט לגמרי או בעל מקדם העברת אור נמוך. גוון הזיגוג במצב זה הוא כחול (ראה איור 23.10). מאחר והבקרה על העברת האור היא חשמלית, ניתן לבצע אותה באמצעות גלאי אופטי פשוט (תא פוטו-אלקטרי) כך שכמות האור העוברת דרך השמשה תופחת כאשר עוצמת הקרינה הפוגעת בחלון עוברת רמה מוגדרת מראש.

הזיגוג האלקטרו-כרומי אומנם מאפשר לבקר את מעבר קרינת השמש דרכו בכדי לשפר את הנוחות הויזואלית של דיירי הבניין, אך איננו מתמודד עם אחת הבעיות המאפיינות את מרבית הבניינים הסולריים: התקנת חלונות גדולים בכיוון דרום, המיועדים לקלוט קרינת שמש בחורף ולחמם את הבניין בשיטת



איור 23.11. עיקרון הפעולה של חלון עם תפקוד משתנה לפי עונות השנה (ימין), ויישום של חלון עם תפקוד משתנה לפי עונות השנה (שמאל).

זיגוג חלבי

זיגוג שקוף מאפשר לראות בעדו, בעוד שזיגוג חלבי עשוי להעביר כמות אור דומה מבלי לאפשר מבט דרכו. זכוכית חלבית מתאימה למצבים אשר בהם אנו מעוניינים למנוע מבט מטעמי פרטיות, אך עם זאת לאפשר מעבר אור, או כאשר אנו מעוניינים לקבל אור מפוזר ורך. לא מומלץ להשתמש בזיגוג חלבי בחלונות נמוכים בלב שדה הראייה משום שהם עלולים להוות מקור לסינוור.

זכוכית שכבות

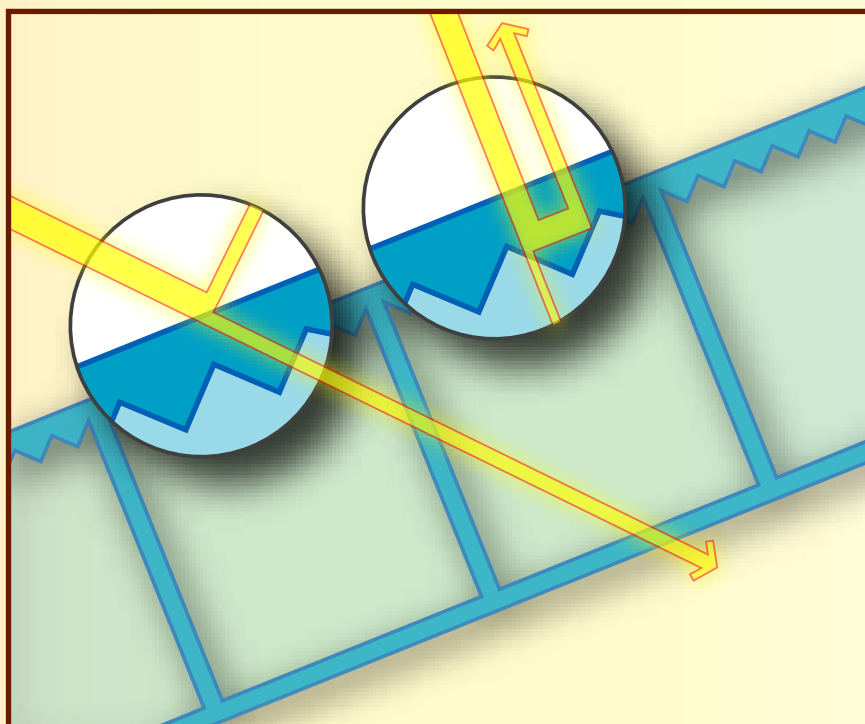
זכוכית שכבות עשויה שתיים או שלוש שכבות של זכוכית וביניהן יריעה פלסטית דקה מאוד. היישומים העיקריים של זכוכית שכבות הם לצרכים אקוסטיים או קונסטרוקטיביים: זכוכית שכבות עמידה יותר בפני נזק מכני מאשר זכוכית יחידה בעובי דומה, ואיננה מתנפצת לרסיסים גם כאשר היא נשברת. עם זאת, ליריעה הפלסטית עשויים להיות גם יתרונות בתחום האופטי והתרמי. יריעות PVB מסננות את קרינת ה-UV כמעט לחלוטין, ובכך מקטינות מאוד את הנזק הנגרם לחפצים שונים בבניין כתוצאה מחשיפה לקרינת השמש. ניתן גם לגוון את היריעה, ובכך להקטין את מעבר האור דרכה.

אחר בתוך הבניין כתוצאה מחשיפה לקרינת שמש ישירה. בקיץ, המערכת מקטינה את החדירה של קרינת שמש בלתי רצויה, ובכך מונעת התחממות יתר של החלל הפנימי ובוהק ליד החלון, מבלי להפריע למבט דרך החלון. בתנאים מסוימים עשויה המערכת אף לבטל את הצורך בתריס חיצוני על החלון.

גוון הזכוכית

לעיתים קרובות, גוון הזכוכית מהווה שיקול חשוב בעיצוב החיצוני של הבניין. עם זאת, חשוב לזכור כי לגוון הזכוכית השפעה על איכות האור ועל העברת הצבע בתוך הבניין. כך למשל חלון בעל גוון כחול יהיה בעל השפעה דומה לזה של מקור אור בעל פילטר כחול. כאשר כל החלונות בשדה הראייה הם בעלי גוון זהה, קשה להבחין בהבדלים בין הגוונים, אולם כאשר מעבר האור דרך הזיגוג הוא נמוך, החלל נראה חשוך והגוונים של עצמים בתוכו נראים עמומים. זכוכית אפורה היא בעלת ההשפעה המועטה ביותר על איכות העברת הצבע, אולם לא ניתן לפי שעה לקבל זכוכית אפורה בעלת ערך K גבוה.

המלצה: בדרך כלל יש להעדיף זיגוג עם ערך K גבוה ככל האפשר, ולבחון חלל ניסיוני באתר בכדי לודא שאין השפעה רבה מדי על גוון האור.



איור 23.12. החזרה פנימית של קרינת שמש בלוח פוליקרבונט עם העברת סלקטיבית.

האור החודרת דרך פתח ולפיזורו, וגם גיוונו במידה והדבר נדרש. בישראל החומר מצוי בעיקר בגוונים של לבן חלבי, שקוף (פחות מזכוכית בכל מקרה) ובגוונים שונים של אדום, כחול, ירוק ועוד.

לוחות אקריליים: לוחות אקריליים זמינים בצבעים שונים ובדרגות שקיפות שונות. לוחות אלה פחות שבירים מזכוכית, אבל הם רגישים לקרינת UV הפוגעת בהם ומתבלים יותר מהר מזכוכית. באזורים מדבריים נוספת גם התבלות בשל שחיקה מאבק וחול המונעים על ידי רוח והשורטים את פניהם. אחד היתרונות העיקריים של לוחות אלו היא עמידותם בפני שבר ממכה.

4.1.4 תכונות המסגרת

הרוב הגדול של מערכות הזיגוג בישראל נתון במסגרות העשויות מתכת, בדרך כלל פרופילי אלומיניום. למאפייני המסגרת, ובעיקר למספר הפרופילים המחלקים ('שפרוצים') בחלון השפעה משמעותית מאוד על התפקוד הכולל של מערכת הזיגוג, ממספר סיבות:

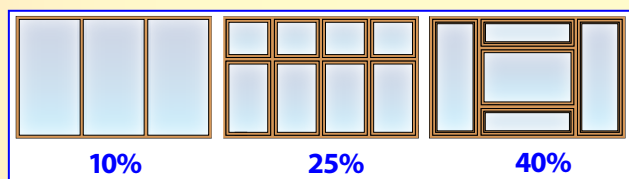
חומרי זיגוג אחרים (מלבד זכוכית)

זכוכית היא חומר הזיגוג הנפוץ ביותר, משום שהיא בעלת קיים ארוך מאוד, חוזק מכני גבוה (איננה נשרטת בקלות) ומשום שניתן להתאים אותה ליישומים שונים ומגוונים. עם זאת, ישנם גם סוגי חומרי זיגוג אחרים בעלי תכונות מועילות.

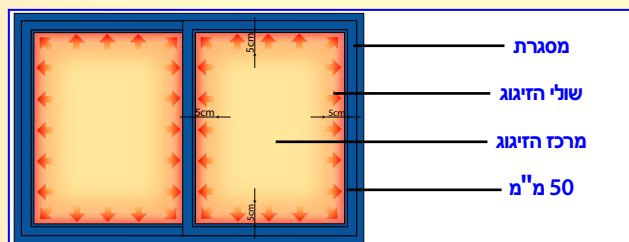
פוליקרבונט: פוליקרבונט הוא חומר פולימרי דמוי זכוכית, הן מבחינת מראהו והן מבחינת התכונות האופטיות שלו. הוא מעביר כ-85% מהקרינה הפוגעת בו, מתחמם פחות מזכוכית החשופה לתנאים דומים וגם חסין מפני שבר במכה. החומר גמיש, נוח לעבודה, ושימושי גם במקרים בהם מבקשים זיגוג לא מישורי. החומר זמין כשקוף,

מגוון בדרגות שונות או "חלבי". בשוק קיימים מספר מוצרים תעשייתיים המבוססים על פוליקרבונט. המוצר הנפוץ ביותר הוא לוח דו-שכבתי שבין שכבותיו צלעות ניצבות לפני המשטח, אשר מיוצר בתהליך של שיחול (extrusion). המוצר הסופי הוא מעט פחות שקוף מזכוכית או מזיגוג פוליקרבונט חד-שכבתי, אבל שכבת האויר הכלואה בין השכבות מעלה את ההתנגדות התרמית שלו. מוצר מענין במיוחד הוא זה שבו פניה הפנימית של אחת השכבות הם בעלי חתך של שיני משור הגורם להחזרות פנימיות של קרינה המגיעה אליהן. חתך זה מאפשר לשנות את היחס בין העברת הקרינה לבין החזרתה על ידי שינויים בזווית ההתקנה של הלוח כלפי מקור הקרינה: מידת העברת הקרינה או החזרתה יהיו תלויים אז בזווית הפגיעה של הקרינה במשטח הפוליקרבונט (איור 23.12).

פיברגלס: החומר המכונה "פיברגלס" עשוי למעשה מפוליאסטר משוריין בסיבי זכוכית. החומר זמין במספר גדלי גלים, עוביים וגוונים. הוא אינו מאפשר מבט דרכו ועמידותו בתנאי חוץ קשים אינה טובה במיוחד. החומר יכול לשמש להקטנת חדירת כמות



איור 23.13. מסגרת החלון עלולה לחסום חלק ניכר ממעבר האור דרך פתח הבנייה בו מורכב החלון.



איור 23.14. המוליכות התרמית של יחידת הזיגוג באה לידי ביטוי רק במרכז הזכוכית. בשולי הזיגוג של חלון עם מסגרת מתכת, עד למרחק של בערך 5 ס"מ מן המסגרת, חלק ניכר ממעבר החום מתרחש דרך המסגרת.

• המסגרת של הזיגוג מהווה חלק ניכר מהשטח הכולל של פתח הבנייה, ולפיכך מקטין במידה ניכרת את חלק הפתח אשר מאפשר מעבר אור דרכו. כפי שמדגים (איור 23.13), המסגרת עלולה להוות בין רבע לשליש (!) משטח הפתח, ביחוד כאשר מדובר בחלונות אלומיניום קטנים עם הרבה חלוקות משנה.

מסגרת עשויה מתכת מוליכה חום היטב, כך שגם אם יחידת הזיגוג מבודדת, חלק ניכר ממעבר החום דרך מערכת הזיגוג כולה יתרחש דרך המסגרת (איור 23.14). לכן, רצוי, משיקולים של מעבר חום, להמעיט ככל האפשר במספר החלוקות של הזיגוג. בנוסף על כך, ישנו יתרון למסגרות העשויות חומרים אשר אינם מוליכים חום באותה מידה כמו מתכת, כגון עץ או PVC. ניתן גם להתקין מסגרות אלומיניום עם הפרדה תרמית, אם כי עלותן גבוהה ואיננה מוצדקת בדרך כלל בתנאי האקלים בארץ.

המורכבות של מערכות הזיגוג והשפעתן הרבה על התפקוד התרמי של הבניין הביאו את משרד התשתיות הלאומיות ליזום תקן ישראלי אשר יסדיר את האופן בו יחושבו ויוצגו התכונות של מערכות הזיגוג בבניינים. התקן, אשר פורסם בשנת 2009, מכונה ת"י 5068 – "מערכות זיגוג בבניינים – סימון בתווית אנרגיה". טבלה 23.2, הלקוחה מן המהדורה האחרונה של ת"י 1045, חלק 0 – "בידוד תרמי של בניינים – כללי", ממחישה את ההבדלים הגדולים בתכונות התרמיות והאופטיות של מערכות זיגוג אופייניות הנפוצות בארץ.

מסגרת	זכוכית	מרווח אוויר (מ"מ)	תכונות הזיגוג (W/m ² K)	תכונות חלון	תכונות חלון
			U SHGC T _{vis}	במידות 1.10 X 0.95 מ' U SHGC T _{vis}	במידות 1.40 X 0.95 מ' U SHGC T _{vis}
עץ	שקופה 3 מ"מ ¹	-	5.96 0.89 0.90	4.84 0.64 0.62	4.97 0.67 0.65
עץ	שקופה 3 מ"מ ¹ שקופה 3 מ"מ ¹	6	3.17 0.76 0.81	3.10 0.56 0.56	3.12 0.59 0.59
אלומיניום	שקופה 3 מ"מ ¹	-	5.96 0.89 0.90	5.91 0.72 0.67	5.92 0.74 0.69
אלומיניום	שקופה 6 מ"מ ²	-	5.87 0.84 0.88	5.84 0.68 0.66	5.84 0.70 0.68
אלומיניום	שקופה 3 מ"מ ¹ שקופה 3 מ"מ ¹	6	3.17 0.76 0.81	4.04 0.63 0.60	3.95 0.65 0.63
אלומיניום	שקופה 3 מ"מ ¹ שקופה 3 מ"מ ¹	16	2.72 0.78 0.81	3.11 0.64 0.63	3.55 0.65 0.63
אלומיניום	שקופה 3 מ"מ ¹ שקופה 3 מ"מ ¹ + 3 _{low-e}	6	2.10 0.60 0.78	3.27 0.51 0.58	3.14 0.52 0.60
אלומיניום	כהה 3 מ"מ ⁴ + 3 _{low-e} שקופה 3 מ"מ ¹	6	2.41 0.28 0.46	3.45 0.26 0.34	3.33 0.27 0.36
PVC	שקופה 3 מ"מ ¹ שקופה 3 מ"מ ¹ + 3 _{low-e}	16	1.83 0.61 0.78	2.05 0.44 0.54	2.03 0.46 0.56

טבלה 23.2. העברות תרמיות, מעבר אור ורווח חום סולרי בחלונות אופייניים.



טבלה 23.2 (המשך)

(T_{vis} – העברות אור של הזיגוג; T_{sol} – העברות קרינת שמש של הזיגוג; E – פליטות בתחום האינפרא-אדום של הציפוי; U – העברות תרמית; SHGC – מקדם רווח חום סולרי)

$$T_{vis} = 0.90, T_{sol} = 0.83^1$$

$$T_{vis} = 0.88, T_{sol} = 0.77^2$$

$$E=0.08^3$$

$$T_{vis} = 0.51, T_{sol} = 0.20^4$$

הערות:

א. החישוב נערך בתנאי סביבה לפי ת"י 5068.

ב. תכונות הזיגוג מתייחסות למרכז השמשה (center of glass), עבור קרינה הפוגעת בניצב למישור הזכוכית. אם יש יותר משמשה אחת (זיגוג כפול), הנתונים מביאים בחשבון את ההשפעה של שתי השמשות, הציפויים ומרווח האוויר.

ג. הנתונים מתייחסים לחלון בגובה 0.95 מ' וברוחב 1.1 מ' או 1.4 מ', עם חלוקה אנכית אחת (כדוגמת חלון הזהה אופקי בעל שתי כנפיים או חלון ציר צד עם שתי כנפיים).

ד. החישוב עבור מסגרת עץ מתייחס לרוחב פרופיל (במישור החלון) של 69.8 מ"מ. שטח המסגרת מהווה 31% משטח חלון ברוחב 1.1 מ' ו-27% משטח חלון ברוחב 1.4 מ'. ההעברות התרמית של המסגרת הינה $U=2.27$ ואט למ"ר קלווין.

ה. החישוב עבור מסגרת אלומיניום מתייחס לרוחב פרופיל (במישור החלון) של 57.2 מ"מ. שטח המסגרת מהווה 26% משטח חלון ברוחב 1.1 מ' ו-22% משטח חלון ברוחב 1.4 מ'. ההעברות התרמית של המסגרת הינה $U=5.68$ ואט למ"ר קלווין.

ו. החישוב עבור מסגרת PVC מתייחס לרוחב פרופיל (במישור החלון) של 69.8 מ"מ. שטח המסגרת מהווה 31% משטח חלון ברוחב 1.1 מ' ו-27% משטח חלון ברוחב 1.4 מ'. ההעברות התרמית של המסגרת הינה $U=1.70$ ואט למ"ר קלווין.

ז. תכונות החלון מבטאות את התרומה הכוללת של הזיגוג ושל המסגרת, ומתאימות רק לחלונות במידות הנתונות. את התכונות של חלונות במידות שונות או עם שילובים אחרים של מסגרת וזיגוג יש לחשב בהתאם לת"י 5068.

4.1.5 מערכות הצללה

מערכות הצללה מיועדות להפחית את קרינת השמש החודרת מבעד למערכת הזיגוג, למטרות שונות: שיפור הנוחות הויזואלית, הקטנת עומסי החום, שמירה על פרטיות ועוד. את מערכות ההצללה ניתן לסווג לפי שני קריטריונים: מיקום מערכת ההצללה ביחס לזיגוג, והאפשרות לבקר את אופן פעולתה בכדי לשנות את כמות הקרינה החודרת לבניין על ידי שינוי מקומו של רכיב ההצללה או שינוי הזווית שלו ביחס לחלון.

מיקום מערכת ההצללה ביחס לזיגוג:

למיקום מערכת ההצללה השפעה מועטה יחסית על הנוחות הויזואלית של אדם השוהה בחדר. עם זאת, יש למיקום השפעה מכרעת על היעילות שלה בהקטנת עומס החום על הבניין. כאשר מערכת ההצללה ממוקמת בתוך הבניין, למשל בצורת וילון, השפעתה על המאזן התרמי מועטה. זאת משום שמרבית הקרינה החודרת מבעד לזכוכית נבלעת באמצעי ההצללה, גורמת לו להתחמם ונפלטת אל חלל החדר בהסעה (כאוויר חם) או בקרינה אינפרא אדומה. כאשר אמצעי ההצללה נמצא מחוץ לבניין, קרינת השמש הנחסמת על ידו איננה משפיעה כמעט על המאזן התרמי של הבניין.



סוג זה של הצללה עדיף אפוא לאין שיעור מן הבחינה התרמית (איור 23.15).

כאשר אמצעי ההצללה ממוקם בין שתי שכבות של זיגוג – למשל תריס ונציאני הכלוא בין שתי השמשות של חלון בעל זיגוג כפול או תריס הממוקם בין שתי מערכות הזיגוג של חזית כפולה,

איור 23.15. הצללה חיצונית עדיפה על הצללה פנימית מבחינה תרמית.

מעבר האנרגיה תלוי במידה רבה במאפיינים של שכבת הזיגוג הפנימית. זאת משום שהתריס מתחמם כתוצאה מן הקרינה הפוגעת בו, ופולט חום אל הסביבה. כאשר השמשה הפנימית מצוידת בציפוי low-e, מעבר החום כלפי החלל הפנימי פוחת מאוד, ועיקר האנרגיה נפלט כלפי חוץ. אם התריס הפנימי הוא בעל גוון בהיר מאוד או ציפוי מבריק, שטף האנרגיה המועבר לחלל הבניין פוחת במידה ניכרת.

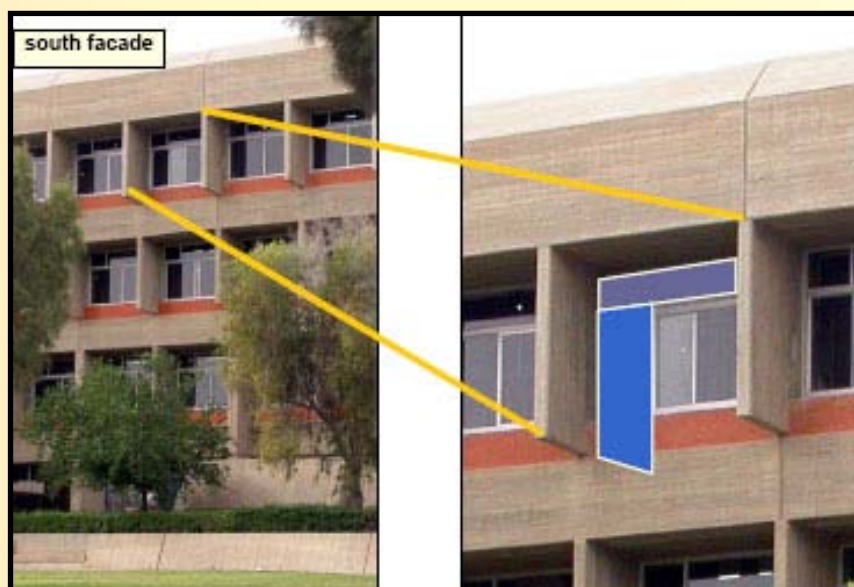
בקרת מערכת ההצללה

מערכת ההצללה הניתנת לבקרה, כגון תריס או וילון, עשויה לתת מענה טוב יותר לשינויים בתנאי הסביבה ולצרכים המיוחדים של דיירי הבניין מאשר מערכת קבועה, כגון גגון חיצוני מעל החלון. אף על פי כן, בניינים רבים מצוידים גם בהצללה קבועה. מהם אפוא היתרונות והחסרונות (ראה טבלה 23.3) של כל אחד מסוגי ההצללה?

הצללה ניתנת לבקרה	הצללה קבועה	
- עשויה לתת מענה מיטבי בכל שילוב של מיקום השמש, תנאי מזג אוויר שונים והעדפות הדיירים - עשויה לתת מענה טוב גם לקרינה לא כיוונית	- דורשת מעט מאוד אחזקה - איננה דורשת תשומת לב מדיירי הבניין - בד"כ זולה יותר - בד"כ חיצונית לזיגוג, ולכן עדיפה מבחינה תרמית	יתרונות
- דורשת אחזקה - בהיעדר תשומת לב מדיירי הבניין, עלולה להיות במצב לא מתאים, כגון תריס סגור כאשר דרושה אנרגיה שמש לחימום, או להיפך - בד"כ מותקנת בתוך הבניין, ולכן פחות יעילה מבחינה תרמית	- איננה נותנת מענה מיטבי בהתאם למסלול העונתי של השמש¹ - איננה נותנת מענה לתנאי מזג אוויר משתנים - איננה נותנת מענה להעדפות השונות של הדיירים - נותנת מענה חלקי בלבד לקרינה מפוזרת מכיפת הרקיע ולקרינה מוחזרת מן הקרקע	חסרונות

¹ הערה: בשל קיבול החום של כדור הארץ, הטמפרטורות המקסימליות נמדדות כחודש עד חודש וחצי אחרי היום הארוך ביותר, בעוד שטמפרטורות המינימום נמדדות כחודשיים אחרי היום הקצר ביותר. בישראל, למשל, שבה היום הארוך ביותר הוא ה-21 ביוני, החודשים החמים הם יולי ואוגוסט, בעוד שהחודשים הקרים ביותר הם ינואר ופברואר, למרות שהיום הקצר ביותר חל ב-21 בדצמבר. לפיכך, הצללה קבועה המיועדת לחסום את קרינת השמש הישירה באוקטובר (שהוא חודש חם יחסית) למשל, ימנע את רווח החום הרצוי בחודש פברואר הקר.

טבלה 23.3. יתרונות וחסרונות של הצללה קבועה וניתנת.



איור 23.16. הצללה חיצונית קבועה הכוללת רכיב אופקי ורכיבים אנכיים.

הצללה חיצונית קבועה

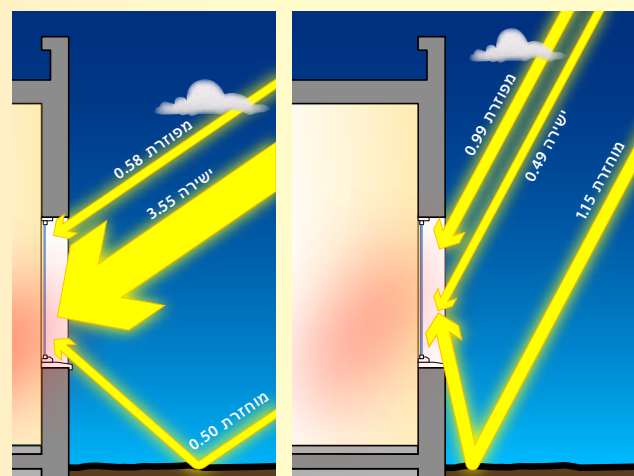
למערכת הצללה חיצונית קבועה עשויים להיות שני רכיבים: רכיב אופקי מעל החלון, ורכיבים אנכיים בצדי החלון. ניתן להתקין את הרכיבים האלו בנפרד או במשולב, בהתאם לפנות החלון, לטכנולוגית הבנייה ועוד.

הרכיב האופקי מעל החלון (המכונה לעיתים 'גגון') מיועד לחסום את קרינת השמש הישירה כאשר השמש נמצאת גבוה מעל האופק. הוא מתאים בעיקר לחזית הדרומית, ומביא תועלת פחותה כאשר הוא מותקן מעל פתחים בחזיתות האחרות.

הרכיבים האנכיים בצדי החלון מיועדים לחסום את קרינת השמש הישירה המגיעה כאשר השמש נמצאת יחסית נמוך מעל האופק, כלומר במערב או במזרח, בתנאי שהחלון איננו פונה ישירות לכיוונים אלה. הצללה זו מתאימה אפוא לחלון בחזית דרום-מערבית או דרום-מזרחית.

כקרינה מפוזרת. איור 23.17 מראה את החלק היחסי של רכיבי הקרינה על קיר דרומי בנגב, בקיץ ובחורף.

לא ניתן לחסום את הקרינה הלא-כיוונית המגיעה אל מישור החלון באמצעות אמצעי הצללה חיצוני, אלא במחיר של חסימה משמעותית של המבט כלפי חוץ ושל הפוטנציאל לתאורה טבעית, למשל על ידי גגון עמוק מאוד החוסם חלק ניכר מכיפת הרקיע או על ידי רפפות צפופות.



איור 23.17. קרינת השמש ישירה, מוחזרת ומפוזרת.

איור 23.16 מראה את התרומה של רכיבי מערכת ההצללה על חלון בחזית דרומית. הצל המוטל על ידי הבליטה האופקית מסומן באפור, בעוד שהצל המוטל על ידי הרכיב האנכי מודגש בכחול.

חשוב לציין כי בעוד שקל יחסית לתכנן הצללה קבועה יעילה לחלון בחזית הדרומית, הרי שלא ניתן כמעט להגן על חלון בחזית מזרחית או מערבית בלי לחסום כמעט לחלוטין את המבט מבעד לחלון החוצה. זאת משום שכאשר השמש נמצאת במזרח או במערב, היא קרובה מאוד לאופק, וכיוון הקרינה הוא כמעט ניצב למישור החלון.

קרינה מפוזרת ומוחזרת

מרבית אמצעי ההצללה החיצוניים הקבועים על חזיתות הבניינים מיועדים לחסום את קרינת השמש הישירה, ומתוכננים בהתאם למיקומה בשמיים בשעות שבהן קרינת השמש איננה רצויה. ההתייחסות למיקומה של השמש ברקיע מאפשר לחסום את הקרינה הכיוונית, אך חשוב לזכור כי חלק ניכר מן הקרינה איננו מגיע ישירות מן השמש, אלא מוחזר מבניינים סמוכים או מפני הקרקע, בעוד שחלק אחר מגיע מכיפת הרקיע



4.2 חדירת אוויר ואורור

אורור הבנין דרוש על מנת להבטיח כי איכות אוויר הפנים תעמוד בדרישות בריאותיות וכן לסילוק ריחות רעים ומזהמים הנפלטים בו. חילופי אוויר בין הבנין והסביבה כרוכים גם במעבר אנרגיה כל אימת שישנו הבדל טמפרטורה ביניהם. מעבר האנרגיה הזה עשוי להיות רצוי, למשל כאשר מבקשים לקרר את הבנין בשעות הלילה בתקופת הקיץ. עם זאת, במהלך חלק ניכר מן השנה מעבר החום איננו רצוי; למשל, כאשר אוויר חיצוני קר חודר אל הבנין בחורף או כאשר אוויר חם חודר אליו בקיץ.

מעבר אוויר דרך מעטפת הבנין מתרחש בעיקר דרך פתחים במעטפת – חלונות ודלתות. בבנייה המסיבית המקובלת בארץ, מעבר האוויר דרך הקירות המסיביים או דרך הגג זניחה.

מעבר האוויר בין הבנין לסביבה הנעשה דרך חלונות פתוחים או בסיוע אמצעים מלאכותיים כמו מפוחים מכונה 'אורור' (ventilation). תנועת אוויר לא מבוקרת – בין אם היא מועילה ובין אם היא גורמת לנזק, מכונה 'חדירת אוויר' או 'אינפילטרציה' (infiltration).

את קצב חילופי האוויר בין הבנין לבין הסביבה מקובל לציין במונח 'תחלופות אוויר בשעה' (ach – air changes per hour). תחלופה אחת בשעה מציינת כי במהלך שעה אחת מתחלף נפח אוויר השווה לנפח הפנימי של הבנין (או הדירה). אין בציון קצב תחלופות האוויר מידע לגבי איכות האוויר בבנין כולו – יתכן בהחלט שבחלקים ממנו לא היתה תנועת אוויר כלל. קצב חילופי האוויר בבנין אשר בו כל הפתחים סגורים (דהיינו – באינפילטרציה) עשוי לנוע בין כ-0.3 חילופי אוויר בשעה בבנין אטום ברמה הגבוהה ביותר לבין 2-3 חילופי אוויר בשעה בבנין הבנוי באיכות נמוכה.

4.2.1 השפעת חילופי האוויר על הנוחות התרמית בבנין

כפי שנאמר קודם, לחילופי אוויר בין הבנין לבין הסביבה ישנה השפעה רבה על מאזן האנרגיה של הבנין. רוב האנרגיה האצורה בבנין, ללא קשר למקורה, נאגרת במסה התרמית שלו – ברצפה, בקירות ובתקרה. כמות האנרגיה האצורה באוויר הנמצא בבנין זניחה,

הדוגמא הבאה ממחישה את המונח תחלופות אוויר בשעה:

בחדר ששטח רצפתו 10 מ"ר וגובה התקרה 2.4 מ' נמצא חלון פתוח בשטח (נטו) של 1 מ"ר. אם מהירות האוויר דרך החלון היא 1 מטר לשנייה (3.6 קמ"ש) בממוצע, כמה חילופי אוויר בשעה יהיו בחדר?

תשובה: דרך החלון עוברים כל שעה 3,600 מ"ק אוויר (מ"ר * מ' לשנייה * 3,600 שניות). נפח החדר – 240 מ"ק (10 מ"ר * 2.4 מ'). מספר חילופי האוויר בשעה הוא אפוא 15 (3600 חלקי 240).

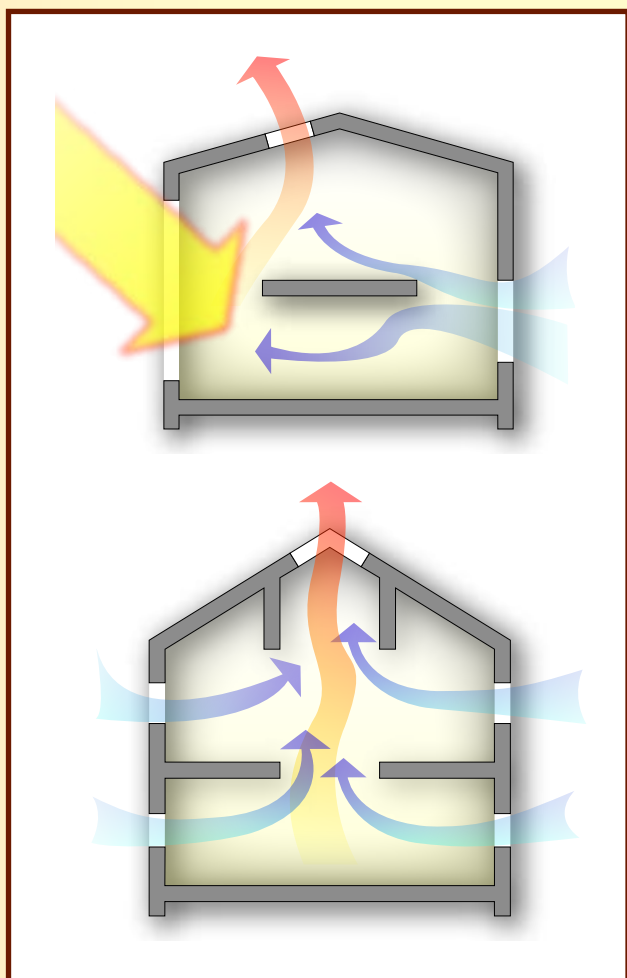
משום שקיבול החום הנפחי של האוויר נמוך מאוד. עם זאת, כאשר הפרש הטמפרטורה בין מסת הבנין לבין האוויר החיצוני גדולה, עשויה תנועת האוויר להסייע כמות משמעותית של אנרגיה ביניהם.

בקיץ, כאשר האוויר החיצוני קר יותר מן המסה של הבנין (בעיקר בלילה, ובמיוחד באזור ההר), אורור הבנין עשוי לסלק עודפי חום אשר הצטברו בה במהלך שעות היום החמות. אורור המיועד לצנן את מסת הבנין מכונה 'קירור מבני' (structural cooling).

המלצה: ניתן להשיג חיסכון ניכר באנרגיה הדרושה למיזוג אוויר אם מאוררים את הבנין בלילה, כאשר הקירור המבני יעיל במיוחד – גם אם הבנין איננו מאוכלס בשעות האלה.

לאורור ישנה גם השפעה נוספת, מוחשית יותר: תנועת האוויר גורמת להגברת הקצב שבו גוף האדם מחליף חום עם הסביבה: בדרך כלל, כאשר טמפרטורת האוויר נמוכה מטמפרטורת העור (כ-35 מעלות), תנועת האוויר מצננת את הגוף ותורמת לשיפור הנוחות התרמית שלנו. תנועת האוויר גם מגדילה את קצב נידוף הזיעה, ובכך מצננת את הגוף, ללא קשר לטמפרטורת האוויר. אורור המיועד לצנן את בני האדם השוהים בבנין על ידי האצת תנועת האוויר סמוך לגופם מכונה 'קירור נוחות' (comfort cooling).

המלצה: קירור נוחות עשוי לשפר את תחושת בני האדם השוהים בבנין גם כאשר טמפרטורת האוויר החיצונית גבוהה מזו שבתוך הבנין – אך בה בעת יגדיל את עומס החום הכולל על הבנין. בתנאים האלה, עדיף



איור 23.18. אפקט הארובה בבניין: אוויר חם משתחרר דרך פתח גבוה ובמקומו חודר אוויר קריר יותר מבעד לפתח נמוך יותר.

$$W = C \times A \times V$$

כאשר:

W – נפח האוויר [מ"ק/שניה]

A – שטחו של הפתח [מ"ר]*

V – מהירות הרוח מחוץ לבנין [מ/שנייה]

C – מקדם יעילות הפתח

ערכים מתאימים עבור C הם: 0.65-0.5 עבור רוח

הבאה מכיוון ניצב לפתח כניסת הרוח לבנין, ו-

0.25-0.35 במקרים של רוח הבאה בזווית מה לפתח

הכניסה של הרוח לבנין.

* במקרה שבו פתחי הכניסה והיציאה הם בעלי גדלים

שונים, יש להשתמש בנוסחה בגודלו של הפתח הקטן

מהשנים.

להשתמש במאוורר ליצור תנועה של האוויר הפנימי – ולא להכניס אוויר חיצוני חם.

4.2.2 חדירת אוויר

חדירת אוויר מתרחשת בעיקר במקומות בהם האטימה בין מערכת הזיגוג לבין פתח הבנייה ובין רכיביה השונים של מערכת הזיגוג אינה מלאה, וכן כאשר הפתח איננו סגור לחלוטין. חדירת אוויר היא בעלת משקל רב במאזן האנרגיה של בניין, במיוחד אם מעטפת הבניין מבודדת היטב: במקרה זה הופכת חדירת האוויר למרכיב מהותי במאזן האנרגיה של הבניין.

4.2.3 אוורור

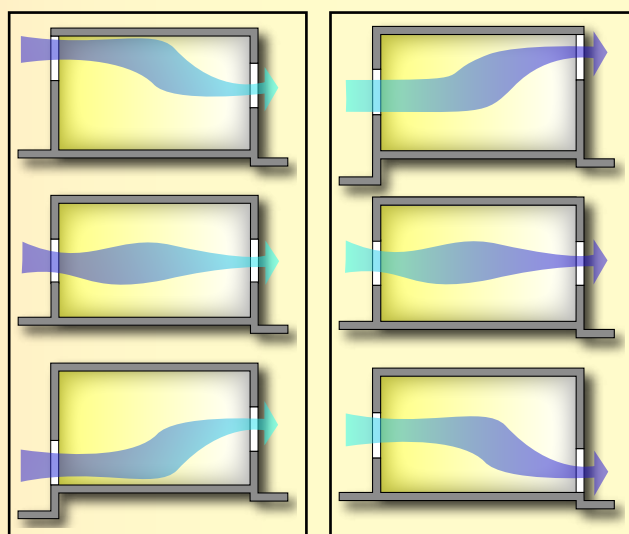
מבחינים בין אוורור טבעי ואורור מאולץ: אוורור מאולץ נעשה בעזרת מפוחים, מאווררים ואמצעי הנעת אוויר אחרים. אוורור טבעי מתקיים דרך פתחים במעטפת הבניין בהשפעת הפרשי לחצים בין האוויר בבניין ובין האוויר החיצוני.

הפרשי הלחצים הינם תוצאה של שני מנגנונים:

הפרש צפיפות ("אפקט הארובה") – נוצר כאשר קיים הפרש טמפרטורות גדול בין פנים הבניין לבין החוץ. טמפרטורה גבוהה יותר בתוך הבניין גורמת להקטנת צפיפותו של האוויר בו וכתוצאה מכך לתנועה כלפי מעלה. אם קיים בבנין פתח גבוה, האוויר החם ייצא דרכו ובמקומו יחדור לבנין אוויר חיצוני קריר יותר דרך פתח תחתון. יעילות המנגנון הזה תלויה בהפרש הטמפרטורה בין הפנים לחוץ, גודל הפתחים בבנין והפרש הגבהים בין (מרכזי) פתח הכניסה ופתח היציאה. איור 23.18 מדגים שני מצבים אשר בהם עשוי להתקיים אפקט הארובה.

הערה: הפרש הצפיפות הנוצר בבנין הוא בדרך כלל קטן מאוד (אלא אם גובהו של הבניין גדול במיוחד). לכן תנועת אוויר בהשפעת אפקט הארובה היא חלשה מאוד, ואיננה מורגשת כאשר נושבת רוח סמוך לבנין.

לחץ רוח – הלחץ המופעל על דפנות הבניין כתוצאה מרוח הנושבת סביבו משפיע על אפשרות האוורור של הבניין. נוסחה אמפירית מקורבת להערכת פוטנציאל האוורור כתוצאה מלחץ רוח היא:



מיקום פתחי האוויר

מיקומם של הפתחים במעטפת הבניין הינו בעל חשיבות רבה להשגת אוורור טבעי יעיל.

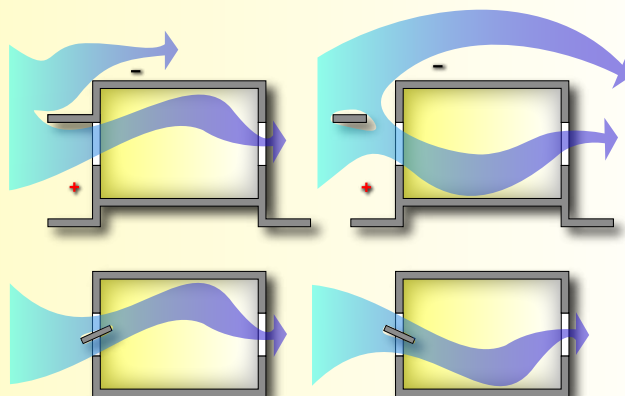
מחקרים מראים שלמיקומו של פתח היציאה אין חשיבות רבה בקביעת מסלול ומהירות תנועת האוויר בחלל המאוורר. זאת משום שהשינויים בזרימת האוויר מתרחשים רק בסמיכות לפתח זה, ולא בנקודות הקרובות יותר לפתח הכניסה. מאידך, מיקומו של פתח הכניסה לחלל הינו בעל חשיבות רבה, והבדלים במיקומו יגרמו למסלולי זרימה שונים ולמהירות שונה של האוויר בתוך החלל המאוורר (איור 23.19).

מסלול תנועת האוויר בחלל חשוב ממספר טעמים. ראשית, משום שהיעילות של קירור נוחות תלויה בכך שתהיה תנועת אוויר באזורי הפעילות שבהם שוהים דיירי הבניין. מאידך, לעיתים קורה כי תנועת האוויר סמוך לבני האדם איננה רצויה, אך קרור מבני דוקא רצוי.

בלי קשר למיקום החלון ביחס לחלל הפנימי, ניתן לכוון את זרימת האוויר ולווסת את מהירותה באמצעות אביזרים המחוברים לקיר מחוץ לפתח או על ידי תריסים שונים (איור 23.20):

- גגון במפלס הגג או אלמנטים אנכיים בצידו הפתח יגדילו את לחץ האוויר בחזית הפתח ויגבירו אז זרימת האוויר דרכו.

- גגון בולט ורתום לקיר מעל הפתח יקטין את זרימת האוויר דרך הפתח, משום שיגרום להטיית



איור 23.20. אמצעים להטיית זרימת האוויר מחוץ לחלון או כחלק ממנו.

איור 23.19. זרימת האוויר בחלל מושפעת בעיקר ממיקומם של פתחי הכניסה, בעוד שלפתחי היציאה השפעה מועטה על מסלול האוויר בחדר.

זרימת האוויר אל מעל הגגון. גם מסלולו של האוויר בתוך החלל המאוורר יוסט כלפי מעלה, מעל למפלס הראש של הנוכחים בחלל (הקטנה באפקט "קירור הנוחות"). גגון שאינו רתום לחלוטין (לכל אורכו) אל קיר הבניין יפתור בעיה זו וזרימת האוויר בחלל תהיה דומה לזו שתיווצר במקרה שאין כלל גגון לפני הפתח.

- תריסי רפפה בפתח יטו את זרימת האוויר בכיוון ההטייה שלהם. יש להתחשב בכך שהטייה זו גם מקטינה את הגודל האפקטיבי של הפתח.

השפעת גודל החלון והיחס בין גודל פתח הכניסה ופתח היציאה

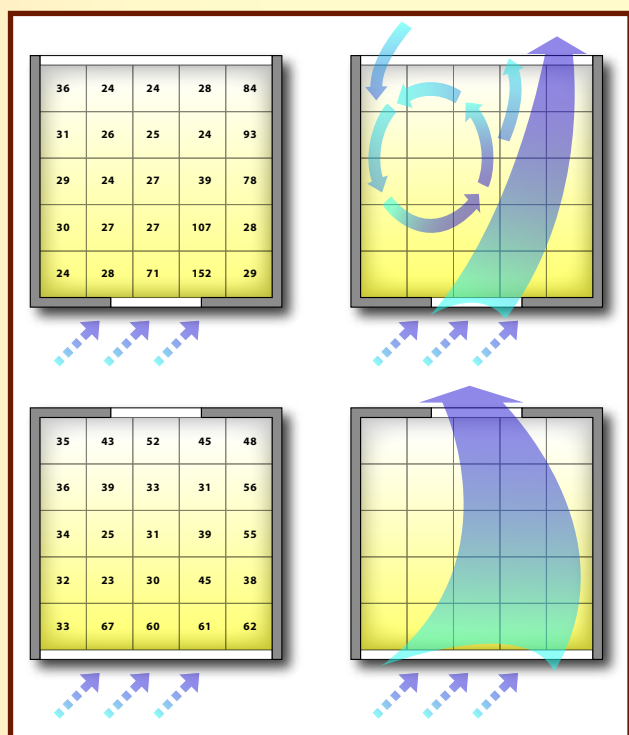
תקנות התכנון והבנייה (התוספת השנייה) קובעות ששטחם הכולל של חלונות בדירת מגורים יהיו לפחות:

- 8% משטח הרצפה בחדר מגורים

- 5% משטח הרצפה במטבח

- 0.3 מ"ר או 10% משטח הרצפה בחדר שירותים (לפי הגדול מביניהם)

כאשר בחדר ישנם לפחות שני פתחים (כגון חלון ודלת), יעילות האוורור תלויה ביחס שבין הגדלים שלהם.



איור 23.21. השפעת הגודל היחסי של פתחי הכניסה והיציאה של האוויר בחדר על מהירות הזרימה הממוצעת ועל מסלול תנועת האוויר. (המספרים בתרשים מציינים את מהירות האוויר בחדר באחוזים ממהירות הרוח מחוץ לחלון).*

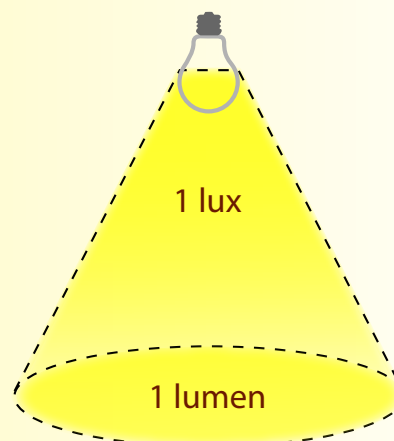
* Givoni B., 1968, Ventilation problems in hot countries. Building Research Station, Technion, Haifa

עילות אורית (luminous efficacy): עוצמת האור (הנראה) עליו מגיבה עין האדם ביחס לאנרגיה הכוללת של מקור האור. נמדדת ביחידות לומן/ואט.

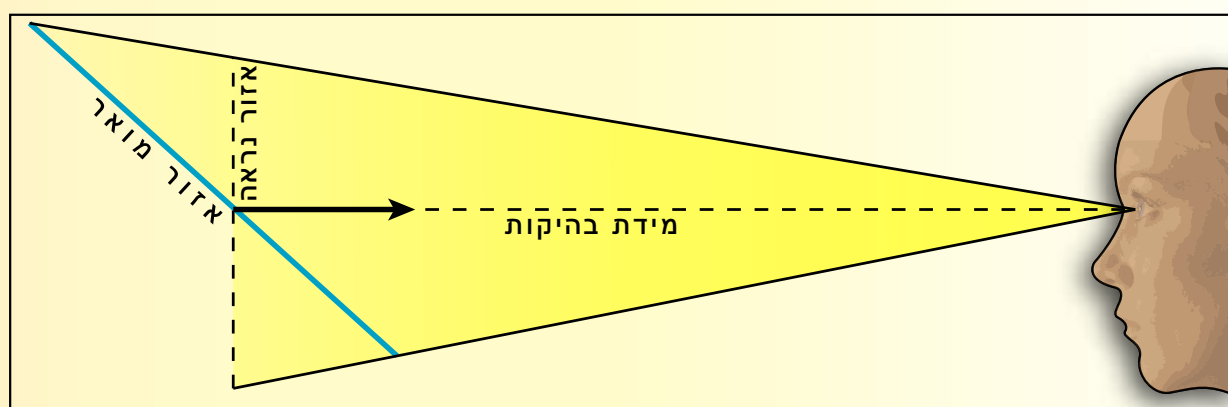
מהירות הזרימה הממוצעת בחדר נקבעת על ידי גודלו של הפתח הקטן יותר. עם זאת, גודלו ומיקומו של פתח הכניסה משפיעים על דפוס הזרימה בחדר, על היווצרות אזורים 'מתים', ועל מהירות הזרימה בסמוך לחלון (איור 23.21). כאשר פתח הכניסה קטן, עשויה מהירות הרוח בסמוך לו להיות גבוהה אף מן הרוח החיצונית, אולם פיזור האוויר הטרי בחדר יהיה בלתי אחיד. כאשר פתח הכניסה גדול, תהיה מהירות הרוח דומה בכל תחומי החדר.

5. הגדרות

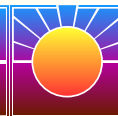
עצמת הארה (illuminance): כמות האור הפוגעת ביחידת שטח. נמדדת ביחידות של לוקס (lux).



בהיקות (luminance): צפיפות שטף האור הנפלט ממקור אור או מוחזר ממשטח בוהק, ליחידת שטח. נמדד ביחידות של קנדלה/מ"ר (candela/m^2).



דירוג סינוור מאוחד (UGR – Unified Glare Rating): שיטה לאומדן של הסינוור העלול להתקבל בסביבת עבודה. הדירוג מתקבל על ידי נוסחה מתמטית המביאה בחשבון את מידת הבהיקות של גורמי הסינוור, את גודלם ואת מיקומם ביחס לציר הראיה של המתבונן, בהשוואה למידת הבהיקות של שאר שדה הראיה (הרקע). הציון על פי מדד זה הוא האמצעי לבחינת סינוור לפי תקן 8995, אולם הוא איננו מתאים לחללים שבהם עיקר האור הוא מן החלונות (תאורה טבעית).



24. חימום וקירור פסיבי



איור 24.1. "דוד שמש": המערכת הנפוצה לחימום פסיבי של מים, כוללת קליטה, אגירה והולכה של חום. צילום: וולפגנג מוצפי-הלר

העולם (כולל אלו באקלים קר מאוד), מקור האנרגיה העיקרי הינו קרינת השמש. מאחר ובישראל קרינת השמש מצויה בשפע, בעוד שמקורות אחרים לאנרגיה מתחדשת הם זניחים, יעסוק פרק זה רק באנרגיית השמש כאמצעי לחימום בניינים.

2.1. רכיבי המערכת של החימום הסולרי

מערכת החימום הסולרי בבניינים דומה בעיקרה לכל מערכת סולרית. לשם המחשה, ניתן להשוותה למערכת הנפוצה לחימום מים לשימוש ביתי – אותו דוד שמש המצוי על גגותינו. במקרה של דוד השמש הנפוץ (איור 24.1), יחידת הקליטה כוללת לוחות גדולים, מזוגגים וכהים אשר מוצבים על הגג; מערכת האגירה הינה דוד המים, אשר בדרך כלל מוצב אף הוא על הגג; ומערכת ההולכה היא צנרת המים המובילה אל הברזים בתוך הבניין.

2.1.1. מחליף חום עם הסביבה: קולט השמש

הקולט הפשוט והנפוץ ביותר הינו חלון – חלון רגיל בקיר או בגג, אשר דרכו חודרת קרינת שמש ומחממת

גם בניין אשר מתוכנן היטב בהתייחס לאקלים ולסביבה יזדקק בדרך כלל לחימום או קירור על מנת לשמור על תנאי פנים נוחים, לפחות במהלך חלק מן השנה. אפשר להקטין את התלות באנרגיה בלתי-מתחדשת לאקלום הבניין על ידי קליטת אנרגיה מן הסביבה בחורף או על ידי פליטת עודפי חום אליה בקיץ. כאשר מעבר האנרגיה נעשה בצורה מבוקרת אך ללא הפעלת מערכות כלשהן, נהוג לכנות אותו 'פסיבי'. (עם זאת, יש המכנים את מעבר האנרגיה 'פסיבי' גם כאשר נדרשת אנרגיה חשמלית מסוימת להפעלת מערכות הבקרה או שינוע האנרגיה, בתנאי שהיחס בין האנרגיה הזו לבין החיסכון באנרגיה בבניין עולה על 1:50).

* * *

1. מעבר אנרגיה בבניין ובין הבניין והסביבה

על מנת שמעבר האנרגיה בין הבניין והסביבה יתרחש באופן מבוקר אשר יתרום לנוחות בבניין, יש לבדד את המעטפת שלו היטב ולאפשר מעבר חום רק כאשר יש בכך צורך – לחימום או לקירור. מערכת לחימום או לקירור פסיבי של בניין כוללת שלושה רכיבים עיקריים:

א. מחליף חום עם הסביבה

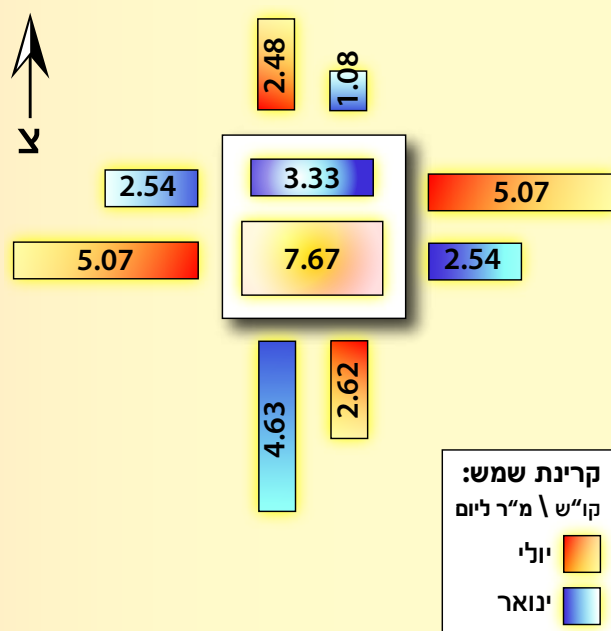
ב. מערכת אגירה

ג. מערכת להובלת האנרגיה בתוך הבניין

כל אחד מן הרכיבים האלה יכול להיות חלק מן הבניין עצמו, אשר משמש גם למטרות אחרות, או רכיב ייעודי אשר נוסף לבניין למטרה זו בלבד.

2. חימום פסיבי

על מנת לחמם את הבניין באופן פסיבי, יש לאתר בסביבה מקור אנרגיה זמין ומתאים לשימוש. האנרגיה הזו עשויה להיות גיאותרמית, למשל, אך ברוב ארצות



איור 24.2. הסך היומי של קרינת השמש על הקירות והגג של בניין בנגב, בקיץ ובחורף.

זווית ההטיה כלפי האופק (tilt angle)

בהנחה שהקולט פונה לכיוון דרום, ישנה חשיבות גם לזווית שבה הוא ניצב ביחס לאופק. כמות הקרינה המרבית בחישוב שנתי מתקבלת על קולט הקבוע בזווית הטיה כלפי האופק השווה לקו הרוחב הגיאוגרפי. בישראל זווית זו היא כ-30 מעלות. עם זאת, מומלץ כי הקולט יותקן בזווית גדולה יותר כלפי האופק – כ-45 מעלות – משום שזו הזווית אשר בה יתקבל שטף הקרינה המרבי בחורף, כאשר הצורך בחימום הוא רב.

כאשר 'מערכת הקליטה' היא בפועל חלונות הבניין, זווית ההטיה היא לרוב אנכית (הזיגוג ניצב לרצפה), משיקולים אדריכליים אחרים: שימוש יעיל יותר בחלל הפנימי ואפשרות להתקנת תריסים ומסתורים אחרים.

חומרי זיגוג

ברוב הקולטים (אם כי לא בכולם!) מותקנת שכבת זיגוג שתפקידה להקטין את איבוד האנרגיה מן הקולט הנמצא במגע עם האוויר בסביבה, שהוא לרוב קר במידה משמעותית ממנו. כמובן שכאשר חלונות הבניין משמשים גם כקולט סולרי, ישנם לזיגוג גם תפקידים רבים נוספים.

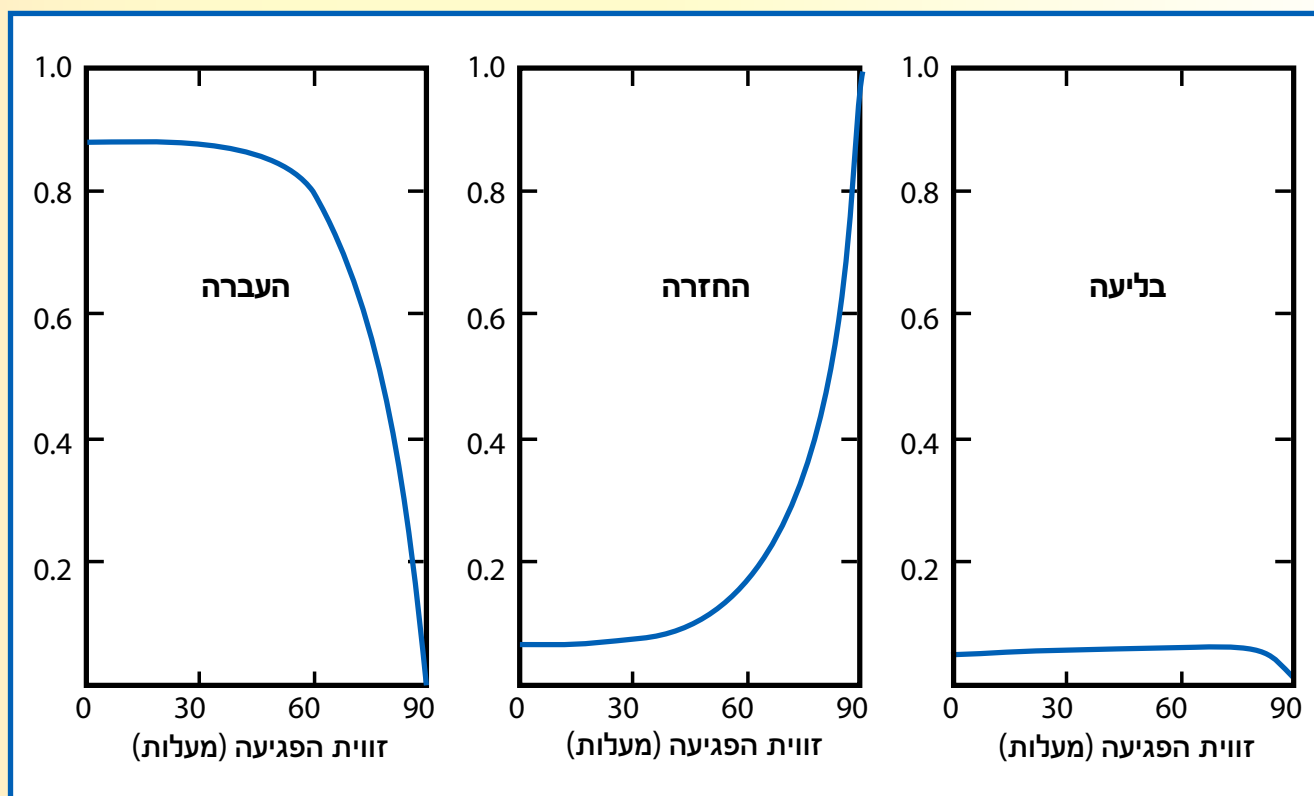
את הבניין. שיטה זו, המכונה חימום סולרי 'בקליטה ישירה', היא ללא ספק הנפוצה ביותר. עם זאת, ניתן להתקין קולטים ייעודיים אשר אין להם שימושים נוספים, לרוב על גג הבניין.

"הרווח הסולרי" (solar gain) של המערכת הסולרית הוא ההפרש בין כמות אנרגיית השמש המנוצלת לחימום הבניין הנצברת על ידה לבין הפסדי האנרגיה מהבניין המתרחשים דרכה. כך למשל חלון החשוף לשמש מחדיר לבניין את מרבית קרינת השמש הפוגעת בו, אבל גם מפסיד אנרגיה מהבניין החוצה בהולכה ובקרינה. ניתן להגדיל אל הרווח הסולרי על ידי תכנון מתאים של הקולט, בין אם הוא חלון ובין אם הוא מתקן ייעודי אחר:

פנות (orientation)

בחירת הפנות הנכונה של האלמנטים הקולטים הנה אולי ההחלטה הראשונה והחשובה ביותר בתהליך התכנון של מערכת חימום סולרית. בישראל הפנות המועדפת לצורך זה היא תמיד הדרומית, משום שבחורף, כאשר יש צורך באנרגיה לחימום, שטף קרינת השמש על משטח הפונה לכיוון דרום גבוה בהרבה משטף הקרינה על משטחים הפונים לכיוונים אחרים. איור 24.2 מראה את התפלגות קרינת השמש הממוצעת לפי הפנות של הבניין בנגב: בחורף מרבית קרינת השמש נופלת על החזית הדרומית של הבניין, בעוד שבקיץ (כאשר אין צורך באנרגיה לחימום), מרבית קרינת השמש נופלת על החזית המזרחית והחזית המערבית של הבניין. אף כי בצפון הארץ ישנה פחות קרינת שמש בחורף מאשר בנגב, גם בגליל ישנה עדיפות ברורה להפניית הקולטים לכיוון דרום.

חשוב לציין כי אף כי קולט הפונה לכיוון דרום יהיה חשוף לקרינת השמש הרבה ביותר, ביחוד בחורף – הירידה בכיוונים אחרים הינה הדרגתית, וההפסד הנוצר כתוצאה מפנות שאיננה מיטבית איננו גדול עד לסטייה של כ-45 מעלות מזרחה או מערבה מן הדרום. ישנה אפוא גמישות מסוימת בתכנון מיקומם של הקולטים – ביחוד אם מדובר בחלונות הבניין, אשר ישנם שיקולים אדריכליים רבים העשויים להשפיע על גודלם ומיקומם. מאידך, חשוב לציין כי כאשר מדובר בחלונות, ככל שהסטייה מכיוון דרום גדולה – מערבה או מזרחה – כך גדל גם העומס על הבניין בקיץ.



איור 24.3. השפעת הזווית הפגיעה על מעבר קרינת שמש בזכוכית שקופה רגילה: העברה (משמאל), החזרה (אמצע) ובליעה (ימין).

מניעת הצללה על הזיגוג

גם אם הקולט מתוכנן ומותקן בצורה מיטבית, יעילותו בפועל עלולה להיות קטנה מאוד אם לא יהיה חשוף לקרינת השמש. קולט שמש יהיה כמעט תמיד חשוף לקרינת שמש מפוזרת (מכיפת הרקיע) או קרינה מוחזרת (מן הקרקע או מבניינים אחרים), אך בימים בהירים הקרינה הישירה מהווה בין 80-85 אחוזים מסך הקרינה. לכן חשוב כי הקולט – בין אם מדובר בחלון ובין אם מדובר בקולט ייעודי – לא יהיה נתון בצילם של בניינים שכנים, צמחייה, או אפילו חלקים אחרים של הבניין עצמו. ככל שצפיפות הבנייה גדולה, כך קשה יותר להבטיח זכויות שמש מלאות, אולם עם קצת מחשבה ותשומת לב בזמן עריכת התב"ע ניתן להגדיל מאוד את שיעור הדירות הנהנות מן האפשרות לנצל את אנרגיית השמש לחימום.

מאידך, חובה על המתכננים לבחון אם בניינים קיימים עלולים להטיל צל על הבניינים שלהם, ולבחון גם את האפשרות שבניינים אחרים אשר יוקמו בעתיד בהתאם להוראות התב"ע לא יעשו כן. במקרה כזה, מומלץ

בכדי למלא את תפקידם במערכת לקליטת אנרגיית השמש, על חומרי הזיגוג להיות בעלי שני מאפיינים עיקריים:

- עליהם להיות שקופים ככל האפשר, בכדי לאפשר מעבר של קרינת השמש אל גוף הקולט.
- עליהם להיות בעלי מולכות תרמית נמוכה, בכדי למנוע הפסדי חום מהקולט.

חומר הזיגוג השכיח ביותר הוא זכוכית, משום שהיא שקופה כמעט לחלוטין לקרינת שמש. עם זאת, יש לזכור כי שיעור קרינת השמש החודר דרך הזכוכית הוא פונקציה של זווית הפגיעה של הקרינה במשטח הזכוכית (incidence angle) (איור 24.3).

דיון מורחב בתכנון מערכות זיגוג בבניינים נמצא בפרק 23, העוסק בעיקר בחלונות. כאשר הקולט איננו משמש גם כחלון, ניתן כמובן להתעלם ממרבית השיקולים העוסקים בהשפעתו של הזיגוג על התנאים האקוסטיים או הויזואליים בבניין, והתמקד בשיקולים התרמיים בלבד.



איור 24.4. קולטי השמש על גג הבנין התחתון מוצלים לחלוטין על ידי הבנין שבמעלה הגבעה. צילום: עודד פוטצ'טר

המסה התרמית הזמינה לאגירת אנרגיה אינה בהכרח כל המסה של הבנין. יעילותה של המסה התרמית נקבעת על ידי היחס בין המוליכות התרמית החומר וקיבול החום הנפחי: ככל שהמוליכות התרמית של החומר גבוהה יותר, האנרגיה נבלעת מהר יותר ומגיעה לעומק רב יותר; ככל שקיבול החום הנפחי גדול יותר, יקטן העומק הפעיל באגירת חום במשך זמן נתון. מאחר והבליעה והפליטה של החום במסה התרמית של הבנין מתרחשים בצורה מחזורית בהתאם לשעות היממה, נמצא כי עבור חומרי הבנייה המקובלים, כגון בטון, העובי האפקטיבי של המסה התרמית (במחזור של 24 שעות) הוא בין 6-12 ס"מ בלבד. מכאן ברור שאין צורך לבנות קירות שעוביים גדול בהרבה ממידות אלה, אם הקיר אגור ופולט אנרגיה מצד אחד בלבד.

טעינה ופריקה:

ככל ששטח הפנים של מסת האגירה גדול ביחס לנפחה, כך יהיה תהליך הטעינה שלה יותר יעיל. מאידך, גם תהליך הפריקה יהיה מהיר יותר, באותה מידה.

טעינת המסה התרמית נעשית בשלשה אופנים:

א. חשיפת ישירה של פני החומר לקרינת השמש – זוהי הדרך היעילה ביותר, והיא מוגדרת כ"טעינה ראשונית".

להימנע מהתקנת מערכת ייעודית לחימום סולרי, אלא אם ניתן למקם אותה כך שתיהנה מחשיפה מלאה לשמש. איור 24.4 ממחיש את הקושי שבהבטחת זכויות שמש לבניינים, ואת הנזק אשר נגרם כתוצאה מכך.

אם החלונות מהווים את מערכת הקליטה והם אינם נהנים משמש ישירה, מומלץ להקטין את השטח שלהם למינימום הנדרש מטעמי אוורור, פתיחה אל הנוף וכיו"ב, משום שאיבוד האנרגיה דרכם בחורף ורווחי חום לא רצויים בקיץ (בהולכה) עלולים להיות לנטל תרמי על הבנין העולה על התועלת שבהתקנתם.

2.1.2. מערכת אגירה

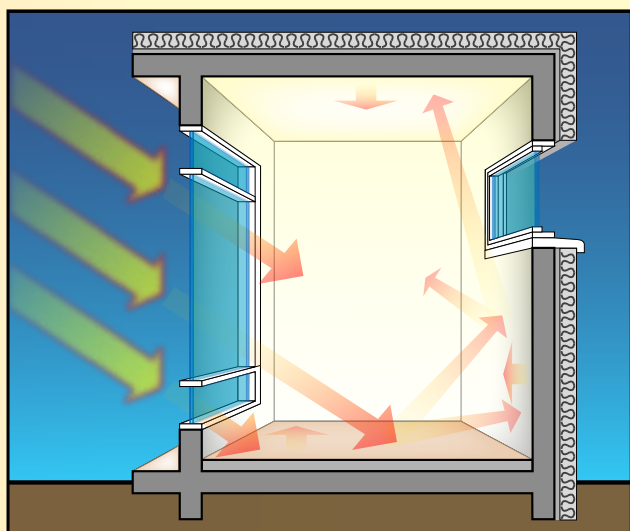
תפקידה העיקרי של מערכת האגירה הינו לאגור אנרגיית שמש אשר תשמש לחימום הבנין בתקופות שבהן איננה זמינה (למשל – בלילה) או שבהן איננה זמינה במידה מספקת (למשל – בימים מעוננים).

עם זאת, למערכת האגירה ישנו גם תפקיד שני: לווסת את הקצב שבו אנרגיית השמש מסופקת לחלל הבנין לצורך חימומו, בכדי למנוע חימום יתר. בימי בהירים בהם יש קרינת שמש חזקה יתכן כי בשעות הצהריים שטף הקרינה הנקלט על ידי המערכת עולה על האנרגיה הדרושה לקיום החלל בטמפרטורה הרצויה. כתוצאה מכך, עלולה הטמפרטורה בבנין לעלות מעבר לתחום הרצוי. בתגובה, עלולים דיירי הבנין לנטרל במידה חלקית או מלאה את מערכת הקליטה (למשל – על ידי סגירת תריסים) או לסלק את עודפי החום החוצה (למשל – על ידי פתיחת חלונות). בשני המקרים, הפוטנציאל לחימום איננו בא לידי ביטוי במלואו, ויתכן כי חוסר האנרגיה יורגש בשעות אחרות.

יעילותה של מערכת האגירה תלויה בשני גורמים: כושר הקיבול התרמי שלה, והאופן בו היא קולטת אנרגיה ומשחררת אותה.

כושר הקיבול של מערכת האגירה

יכולתה של מערכת האגירה להכיל אנרגיה תלוי בכמות החומר (במסה שלו) ובחום הסגולי של החומר. לחילופין, ניתן לאמוד את כמות החומר הפעיל בהתאם לנפחו, ביחוד אם לא מנצלים את המסה התרמית של הבנין עצמו ומתקינים מאגר הנבנה במיוחד למטרה זו.



איור 24.5. חתך סכמתי בבניין המחומם בקליטה ישירה.

סולריים בגלל בידוד לא מספיק של חלק מהקירות או בשל איבוד אנרגיה רב דרך החלונות. בחללים המחוממים במערכות תרמו-סיפוניות, כגון קירות טרומב מאווררים, עלול להיווצר ריבוד אנכי של הטמפרטורות משום שהאוויר המחומם חוזר אל החדר קרוב לתקרה, ויש לדאוג לכך שיידחף כלפי מטה באמצעים מכניים (למשל מאוורר תקרה). במערכות של אגירה רחוקה, שאינן כמעט בשימוש בארץ, ניתן לקבל חימום אחיד דרך רצפת החלל.

אם אנרגיה רבה מדי מצטברת בחלל המחומם והטמפרטורה בו עולה מדי, ניתן להעביר את חלקה לחללים אחרים ללא אמצעים מיוחדים, אפילו רק על ידי פתיחת דלת. ככל שפתח הדלת גבוה יותר יעילות העברת האנרגיה תגדל, ומומלץ להגביה את הפתח עד לגובה התקרה, באמצעות חלון עליון.

בבנינים המנצלים אגירה רחוקה של אנרגיה תמיד תהיה דרושה מערכת - קרוב לוודאי מכנית - להעברת האנרגיה אל החללים הדורשים את החימום. העברה זו תעשה בהסעה. במקרים כאלה יש להתגבר על התנגדות האוויר והחיכוך בתעלות האוויר, והדבר כמובן מקטין את היעילות האנרגטית של המערכת. כתוצאה משימוש במפוחים או מאווררים עלול גם להיווצר מטריד רעש בחללים אליהם מגיעות התעלות.

2.2. מערכות סולריות לחימום מבנים

בפרק זה יידונו מערכות סולריות שונות המשמשות לחימום מבנים. תתוארנה בעיקר מערכות סולריות

ב. קליטת אנרגיה בקרינה ממשטח "שכן" החשוף כולו לשמש. זו מוגדרת כ"טעינה שניונית". במקרה הזה טמפרטורת הקרינה הממוצעת (mean radiant temperature) של הגוף המקרין (השכן) חייבת להיות גבוהה יותר מטמפרטורת המשטח החיצוני של המסה האוגרת.

ג. קליטת אנרגיה בהסעה מאויר חם הזורם בסמוך למסה האוגרת. זו מוגדרת כ"טעינה שלישונית" והיא הפחות יעילה מבין מנגנוני הקליטה. במקרה זה האוויר בקולט חייב להתחמם לטמפרטורה גבוהה מזו של המשטח החיצוני של המסה האוגרת, לפני שמתחילה העברת אנרגיה מהאוויר אליו.

פריקת המסה התרמית נעשית בעיקר על ידי קרינה ארוכת גל ועל ידי הסעה באמצעות האוויר הנמצא בסמוך לפני המסה.

2.1.3. מערכת להובלת החום בבניין

לאחר קליטתה של אנרגיית השמש במערכת הקליטה יש לפזר אותה בכל רחבי הבניין המחומם. פיזור החום בבניין תלוי מאוד בשיטת האגירה ובתכנונו של הבניין.

אחד האתגרים העיקריים בתכנון מבנים סולריים הוא להשיג פיזור חום טבעי ללא צורך במערכת מכנית שתוכל להעביר את האנרגיה ממקום אחד בבניין אל החדרים המחוממים. רצוי למקם את קולטי האנרגיה בחללים המחוממים עצמם או בסמוך אליהם, ורק אם מיקום כזה אינו אפשרי להשתמש במערכת הסעת אנרגיה המופעלת באמצעות מפוחים או משאבות.

יש לדאוג לפיזור אחיד של החום בחלל המחומם בכדי שלא יוצרו אזורים חמים יותר או פחות בתוך החלל. אלה יכולים להיווצר במיוחד ליד הרצפה ובסמוך לתקרה. בחללים המחוממים בקליטה ישירה אשר בהם מספיקה מסה ראשונית או שניונית לאגירת האנרגיה, הדבר נעשה כמעט מאליהם על ידי העברת אנרגיה בקרינה בין הקירות ובהסעה בין הקירות לבין האוויר. התוצאה המתקבלת היא שבדרך כלל טמפרטורת הקירות קרובה מאוד לטמפרטורת האוויר, ומתקבלת נוחות תרמית גם בטמפרטורות נמוכות יותר מחדרים שבהם הקירות קרים יותר מהאוויר.

לפעמים יכולים להיווצר הבדלי טמפרטורה בחללים



איור 24.6. החזית הדרומית של בניין המחומם בקליטה ישירה

- פני החזיתות האחרות) והתאמת גודלם לשיעור האנרגיה שמבקשים להשיג מקרינת השמש.
- כל החומרים והאמצעים הטכניים הדרושים לבניית מבנים עם קליטה ישירה זמינים מהמדף ואינם מייקרים כמעט את עלות הבניין.
- כל רכיבי המערכת אינם מתחממים לטמפרטורות גבוהות, ולכן ההפסדים קטנים.
- חסרונות מערכת קליטה ישירה:
 - ניתנת ליישום רק בחללים אשר יש בהם חלון הפונה לדרום.
 - שטחי זיגוג גדולים יכולים לגרום לבוהק בחלל המחומם.
 - הקרינה האולטרה-סגולה (UV) שהיא חלק מקרינת השמש גורמת לדהיית חפצים בחדר המחומם.
 - הטמפרטורה הקרינתית הממוצעת במקומות בהם ישנם כתמי שמש בתוך החדר גבוהה מאוד אפילו בחורף, ויכולה לגרום לאי-נוחות תרמית.
 - אם אין אפשרות לבדד את החלונות בלילה (למשל באמצעות תריסים), נגרם איבוד אנרגיה רב.
 - חלונות גדולים עלולים לגרום לאובדן פרטיות, בעיקר בלילה.

2.2.2. קליטה בלתי-ישירה

בשיטת הקליטה הבלתי ישירה, מערכת הקליטה כוללת שמש החשופה לשמש ומאחוריה קיר מסיבי, וביניהם חלל אוויר. ישנן מספר וריאציות שונות של שיטה זו,

אשר נמצאות בשימוש בישראל או אשר תכונותיהן מתאימות לשימוש בארץ.

2.2.1. קליטה ישירה

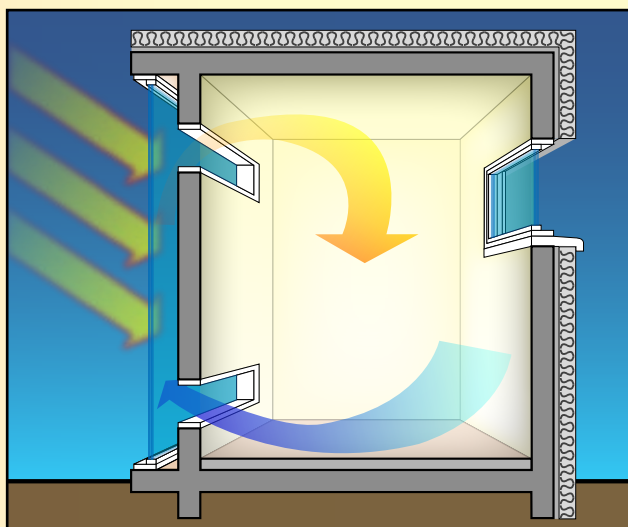
מערכת ל'קליטה ישירה' היא המערכת הפשוטה ביותר בין מערכות החימום הסולרי. זוהי המערכת היחידה כמעט בה נעשה שימוש בישראל, בעיקר בגלל שיקולי עלות. עלותה הנמוכה של המערכת הזו נובעת מכך שעיקרה הוא רכיבים הקיימים ממילא בבניין הישראלי האופייני – הקליטה נעשית באמצעות החלונות ואגירת החום נעשית בקירות וברצפה. לעתים יש צורך לשנות במקצת את גודלם של הרכיבים האלה, אבל בעיקרו של עניין אין בכך תוספת משמעותית לעלות הבניין.

כיוון החלונות הקולטים הוא לכיוון דרום. בשל זווית הגובה הנמוכה יחסית של השמש בחורף, קרינת השמש הישירה פוגעת בחלון (בעיקר בשעות הצהריים בהם הקרינה חזקה במיוחד) בזווית הקרובות לניצב, כך שכמעט כל הקרינה חודרת לבניין מבעד לזכוכית. בקיץ נמצאת השמש בזווית רום גבוהה יותר, ולכן זווית הפגיעה של קרינה בזיגוג היא שטוחה יחסית, וחדירתה דרך הזיגוג קטנה יותר. (עם זאת מודגש שתכונה זו בלבד לא תמנע התחממות חללי הבניין במשך הקיץ כתוצאה מהקרינה, ויש להגן על משטח הזיגוג באמצעים אחרים).

הבניין הסולרי זקוק לכמות מספקת של מסה לאגירת האנרגיה הנקלטת על ידי החלונות הדרומיים. לצורך זה משמשים הקירות החיצוניים (בתנאי שהבידוד התרמי הוא חיצוני), תקרות, רצפות ומחיצות פנימיות הבנויות מבלוקי בטון (לא מחיצות גבס). במשך היום המסה הזו אוגרת את קרינת השמש הפוגעת בה, ובלילה היא משחררת אותה לחלל הבית. כך מושגת בתוך הבניין משרעת טמפרטורה קטנה בהרבה מזו הקיימת בחוץ. כל רכיבי המערכת הסולרית חייבים להיות מתואמים ביניהם: חלונות גדולים מדי ומסת אגירה מעטה מדי, למשל, עלולים לגרום להתחממות יתר.

יתרונות מערכת הקליטה הישירה:

- מערכת הקליטה הישירה היא המערכת הפשוטה והזולה ביותר להתקנה. ברוב המקרים היא דורשת רק למקם חלונות ופתחים מזוגים הדרושים בלאו הכי בבניין בחזית הדרומית (בעדיפות על



איור 24.7. חתך סכמתי בבניין המחומם עם קיר טרומב.

הנבדלות זו מזו במיקום הבידוד התרמי בקיר ובאופן הבקרה על תנועת האוויר ברווח שבין הזכוכית והמסה התרמית. הקיר יכול להיבנות מכל אחד מחומרי הבניה הכבדים – בטון, סיליקה, לבנים, אבן, אדמה וכו'.

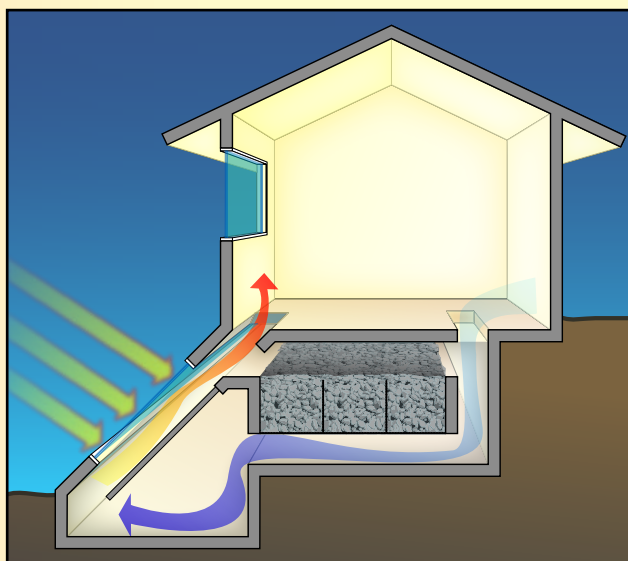
בשיטת הקיר האוגר מחומם הקיר שמאחורי הזיגוג ומעביר את האנרגיה אל החלל המחומם רק בהולכה דרך הקיר. החום מועבר מן הצד הפנימי של הקיר אל החלל המחומם בקרינה ובהסעה (של אויר הקרוב למשטח הפנימי של הקיר המחומם). פיגור הזמן הנוצר בחימום החלל המחומם תלוי בעובי הקיר ובחומר ממנו הוא עשוי. פיגור זמן אופייני בבטון הוא כ 18-20 דקות לכל ס"מ של עובי הקיר.

בקיר טרומב (Trombe wall) ישנם פתחים בחלקו העליון ובחלקו התחתון, המאפשרים לאוויר לזרום בחופשיות מהחלל הפנימי בבניין אל המרווח שבין הזיגוג לבין הקיר, ובחזרה. כאשר הקיר חשוף לקרינת שמש ומתחמם, האויר הנמצא ברווח שבינו לבין הזכוכית מתחמם אף הוא, עולה למעלה וחוזר דרך הפתח העליון אל החלל המחומם. במקומו חודר למרווח אויר קר יותר המגיע מהחלל המחומם. האוויר הנמצא בחלל שבין משטח הזיגוג לבין הקיר האוגר עשוי להגיע לטמפרטורות גבוהות יחסית – בישראל יכולה הטמפרטורה לעלות עד כדי 60°C . בתהליך מחזורי זה מועברת אנרגיית השמש בהסעה אל החלל המחומם. בנוסף לחימום בהסעה מתקבל גם חימום בהולכה דרך הקיר, מאחר והמשטח החיצוני של הקיר (זה הפונה אל הזיגוג) מתחמם ומגיע לטמפרטורות גבוהות יותר מאלה הקיימות בצדו הפנימי של הקיר. זהו מנגנון יעיל – פיגור הזמן של רכיב החימום בהסעה יכול להיות קצר יחסית, כך שהחימום יתחיל כמעט מיד עם חשיפת הקיר לקרינת השמש – ואילו החימום בהולכה יאחר במספר שעות. מערכת זו מאפשרת להאריך את זמן החימום המתקבל מהקיר למשך רוב שעות היום וגם לשעות הראשונות של הלילה. חשוב לשים לב כי בשעות הלילה יתקרר החלל שבין הזיגוג לבין הקיר האוגר, ועלולה להיווצר בו זרימה הפוכה – האויר בתוכו יזרום כלפי מטה, ימשוך אויר חם מחלקו העליון של החלל המחומם ויחדירו חזרה אל החלל המחומם בטמפרטורה נמוכה יותר. למניעת התופעה הזו יש לדאוג לסגירת הפתחים בתחתית ובראש הקיר בשעות הלילה, בעזרת מדפים שניתנים לפתיחה ולסגירה.

קיר האגירה המבודד הוא במהותו קיר טרומב שבו קיר האגירה הנמצא מאחורי הזיגוג מבודד מצידו הפנימי (צד חלל הבניין). בשיטה הזו נמנעת כל העברת אנרגיה מהחוץ פנימה בהולכה ובקרינה, וכל האנרגיה מועברת אל תוך החלל בהסעה – טבעית או מאולצת (על ידי מערכת מכנית). היתרון של מערכת כזו הוא שפיגור הזמן שלה הוא קצר יחסית והחימום מתקבל בחלל



איור 24.8. חתקנת זיגוג מהצד החיצוני של קיר האבן על מנת להפוך אותו לקיר אוגר.



איור 24.9. חתך סכמתי בבנין עם מערכת קליטה סולרית מרוחקת. אם הבנין מסיבי, אין צורך במסת אגירה מיוחדת במרתף.

ישירות לחלל המחומם ויכול להמצא גם במרחק מה ממנו. במערכות פסיביות אמיתיות, העברת האנרגיה בין הקולט לבין מסת האגירה או החלל המחומם, או לשניהם ביחד, נעשית באמצעות הסעה תרמו-סיפונית. במערכות אלה האויר החם המצטבר בקולט השמש מתחמם ועולה כלפי מעלה. אם החלל המחומם או מתקן האגירה נמצא מעליו, יזרום האויר ממנו אליהם בזרימה תרמו-סיפונית. עם התקררותו של האויר בחלל המחומם הוא יזרום בחזרה אל הקולט, יחומם שוב ויזרום חזרה אל החלל המחומם. טבעת הזרימה הזו תימשך כל עוד יקלוט קולט השמש די קרינה לחימום האויר לטמפרטורה שתאפשר אותה. במערכות היברידיים ההסעה מבוצעת גם באמצעות מפוחים ומאווררים. איור 24.9 מראה יישום אפשרי של מערכת חימום מרוחקת, הכוללת גם אגירה מיוחדת במרתף.

המערכת התרמו-סיפונית מורכבת מקולט שמש שאין בו אגירה תרמית, הממוקם במקום הטוב ביותר האפשרי לקליטת שמש בעונת החורף - מבחינת הפנות וההטיה - ומתחת לחלל המחומם או מסת האגירה. הקולט דומה במבנהו לקולט המים הפופולרי של מערכות ביתיות לחימום מים, אלא שבמקום מים מזרימים בו אויר: לוח זיגוג הממוקם מספר סנטימטרים לפני לוח מתכת כהה המבודד בצדו האחורי. כניסת האויר אל הקולט הזה תהיה מהצד התחתון, יציאת האויר תהיה

המחומם בסמוך לחשיפת הזיגוג לשמש. יעילותה של מערכת זו היא נמוכה יותר מאלה שנמנו קודם, בעיקר משום שהקיר האוגר, שטמפרטורת צדו הפונה אל הזיגוג יחסית גבוהה, מקרין חום החוצה דרך הזיגוג וגורם להפסדים גדולים יותר.

יתרונות הקליטה הבלתי-ישירה:

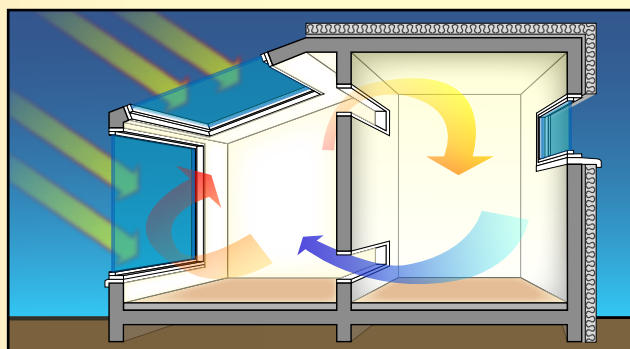
- בעיות הבוהק והנזקים הנגרמים על ידי הקרינה האולטרה סגולה בקליטה הישירה נמנעים.
- אין בעיית פרטיות.
- בדרך כלל משרעת הטמפרטורה בתוך החלל המחומם קטנה יותר מאשר בבניינים מחוממים בקרינה ישירה.
- ניתן בקלות יחסית לווסת את פיגור הזמן שבין קליטת האנרגיה על ידי המערכת לבין העברתה אל החלל המחומם בכדי להתאימה לצורכי הדיירים ובכדי לקבל ניצולת גבוהה של המערכת.

חסרונות הקליטה הלא ישירה:

- כמו בקליטה הישירה, גם קיר האגירה מתאים ליישום בעיקר בחזית דרומית.
- בהשוואה לקליטה הישירה, קיר קולט יקר בהרבה: הוא כולל קיר בנוי וזיגוג גם יחד.
- המשטח של הקיר האוגר הוא יחסית חם, ומאחר והוא נמצא קרוב מאוד לזיגוג הוא חשוף יותר לטמפרטורות החיצוניות. התוצאה היא איבוד משמעותי של אנרגיה דרך המשטח המזוגג: יעילות המערכת נמוכה במידה ניכרת ביחס לקליטה ישירה.
- המערכת מגדילה את עובי הקיר החיצוני, ובכך מקטינה את השטח הפנימי הנותר של בניין במעטפת נתונה. (לפי תקנות הבנייה, מביאים בחשבון את עובי הקיר בחישוב שטח הדירה, ובדרך כלל הוא נחשב גם לצורך ארנונה.)
- הצורך בשטח זיגוג גדול המופנה דרומה בא על חשבון פתחים מזוגגים אחרים הרצויים בחללי הבניין, לאוורור ולמאור.
- קשה לנקות את הצד הפנימי של השמשה הפונה כלפי הקיר האוגר.

2.2.3 קליטה מרוחקת

במערכות קליטה מרוחקת קולט השמש אינו קשור



איור 24.10. חתך סכמתי המדגים מעבר חום מחממה אל החלק העיקרי בבניין.

החממה היא חלל צמוד לקיר הדרומי של הבניין שחלק ניכר מדפנותיו וגגו עשויים זכוכית. חלל החממה מחומם על ידי האנרגיה הסולרית החודרת דרך הזיגוג, אגירת האנרגיה נעשית בקיר אוגר הממוקם בין החממה לבין החלל המחומם, ברצפת החממה, בכל מסה אוגרת אחרת הנמצאת בתוך החממה, או במסה האוגרת של החלל המחומם עצמו. במקרה האחרון הובלת האנרגיה תהיה על ידי הסעה מחלל החממה אל החלל המחומם, שם תבלע האנרגיה על ידי המסה של החלל המחומם. רצוי לבודד את כל האלמנטים שהם בעלי פוטנציאל אגירה בתוך החממה עצמה, בכדי שכל האנרגיה הנוצרת בחממה תוכל להיות מועברת אל החלל המחומם. העברת האנרגיה הזו יכולה להיעשות בצורה פסיבית או בעזרת מפוח. ההעברה הזו צריכה להיות מהירה יחסית, שכן אחרת תעלה הטמפרטורה של חלל החממה וההפסדים החום דורשת מפוח (ולכן הגדולים יהיו משמעותיים).

מאחר והחממה אינה חלק אינטגרלי של הבניין, אין צורך להשקיע בה אנרגיה במקרה שהטמפרטורה שלה יורדת מתחת לרצוי, אבל אז יש לחסום את מעבר האנרגיה מתוך הבניין אל החממה.

חממה צמודה ניתנת לשימוש בשני אופנים:

- א. כחלל עזר לבניין המחומם בקליטה ישירה. במקרה שכזה יכולה החממה להיות חלל נוסף בבניין אשר ניתן להשתמש בו חלק מהשנה, בדומה למרפסת.
- ב. כקולט בקליטה לא ישירה, המייצר אוויר חם שאותו ניתן להעביר אל חללים אחרים בבניין ולקבל חימום על ידי הסעה.

בחלקו העליון. זרימת האוויר בין החלקים השונים של המערכת מונעת בכוח הפרש הצפיפות שבין האוויר הקר לבין האוויר החם. בלילות יש צורך לדאוג להפסקת הזרימה של האוויר במערכת, שכן תנאי הלילה עלולים ליצור זרימה הפוכה – להעביר אוויר חם דרך הקולט, לקררו ולהחזירו לחלל המחומם. בקיץ ניתן לנטרל את המערכת על ידי פתיחת נתיבי ההובלה של האוויר והוצאת האוויר החוצה, או על ידי כיסוי הקולט.

יתרונות הקליטה המרוחקת:

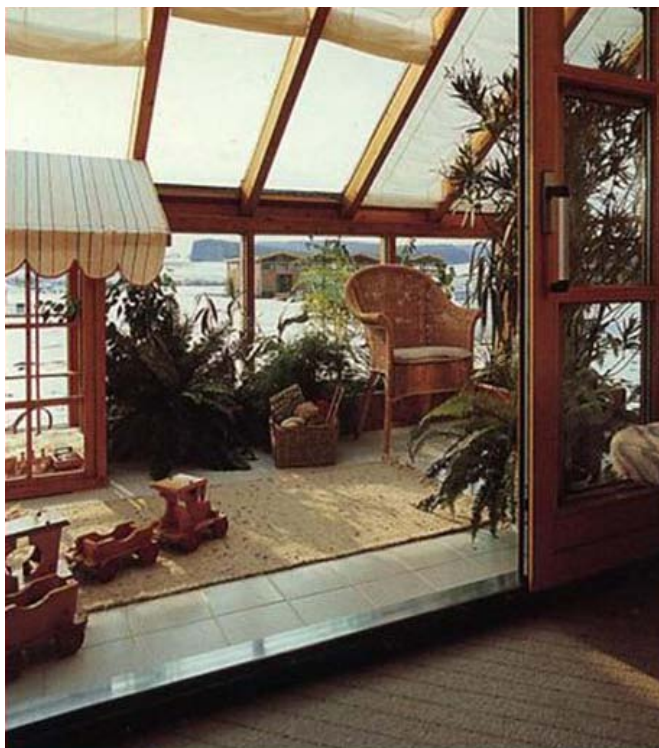
- הזיגוג בקולט אינו משפיע על תפקוד החדרים, כך שבעיות הבהוק, הקרינה האולטרה סגולה, והפרטיות אינן קיימות.
- גודל השטח המזוגג אינו תלוי בתכנון של שאר הבניין.
- ניתן לחמם בעזרתה גם חללים שאינם פונים לדרום.
- קל לבטל את פעולתה בימים חמים שבהם אין צורך באנרגיה נוספת.

חסרונות הקליטה המרוחקת:

- היעילות התרמית של מערכות אלו נמוכה.
- רק תכנון זהיר וקפדני יבטיח זרימת אוויר יעילה בין הקולט לבין החלל המחומם.
- אנרגיית החימום נמסרת לחלל המחומם בהסעת אוויר חם. אגירת אנרגיה שמקורה באוויר חם קשה יותר ופחות יעילה מאגירה שנעשית על ידי הקרנת המסה האוגרת בקרינה ישירה או אפילו משנית.
- אם קולט השמש אינו ממוקם מתחת לחלל המחומם ו/או מסת האגירה, העברת החום דורשת מפוח (ולכן אינה פסיבית לגמרי).

2.2.4. חממות

מהבחינה הטכנית החממה הצמודה לבניין היא תת סוג נוסף של מערכות קליטה לא ישירה, אולם בשל שימושיה האדריכליים והפופולריות העולה שלה ראוי להתייחס אליה באופן נפרד. באנגלית נקראת החממה "חלל-שמש" (Sunspace) – השם עצמו מצביע על שונותה של החממה מאמצעי חימום אחרים.



איור 24.11. לחממה הצמודה לבנין צורות ושימושים שונים.

- לבילוי, לגידול צמחים לנוי או לאכילה
- ניתן לשלב בה שטחי זיגוג גדולים, כמעט ללא מגבלות גיאומטריות החלות על חלונות בקירות הבניין.
- ניתן להוסיף חממות לבניינים קיימים (בעיקר בקומת קרקע).
- ניתן בקלות לשלב חממות עם אמצעים אחרים לחימום סולרי באותו הבניין.

חסרונות החממה:

- עלות החממה עלולה להיות גבוהה מאוד (אם כי התועלת שבה איננה מוגבלת רק לרווח אנרגיה).
- בקיץ עלול להיווצר בחממה חימום יתר.
- החממה אינה ניתנת לניצול בכל ימות השנה או אף בכל שעות היממה, בין היתר משום שנוצרים בה הפרשי טמפרטורה גדולים בין היום לבין הלילה.
- היעילות התרמית של החממה נמוכה, משום ששטח הפנים שלה גדול ולא מבודד ומשום שהצימוד התרמי לשאר הבניין הינו חלש.

מבחינה גיאומטרית חממות יכולות להיות בעלות צורות שונות, החל מחלל צמוד לקיר אחד של בניין, כאשר שאר דפנותיו (חוץ מהרצפה) עשויים זכוכית, ועד לחלל אשר סגור בין שלשה קירות של הבניין ואשר יש לו רק דופן מזוגגת אחת. מבחינת גובה חלל החממה יש לקחת בחשבון שבחממה גבוהה מדי (יותר מקומה אחת) יוצר ריבוד (stratification) של האוויר: האויר החם יעלה למעלה והטמפרטורה בחלק התחתון של החממה עלולה להיות נמוכה במידה ניכרת. תופעה זו יכולה לתרום להסעת אויר חם מחלל החממה אל החלל המחומום, אבל היא פוגעת בתכונותיה כחלל שימושי במבנים אנשי הבית.

בקיץ חייבים לנטרל את פעילות החממה כדי למנוע חימום יתר של החלל המחומום הצמוד אליה. הדרכים המועדפות לנטרול חממה הן פתיחת דפנותיה (עליהן להיות ניתנות לפתיחה) או הצללה שלהן.

יתרונות החממה:

- החממה מהווה תוספת לשטח השימושי של הבניין



3. קירור פסיבי

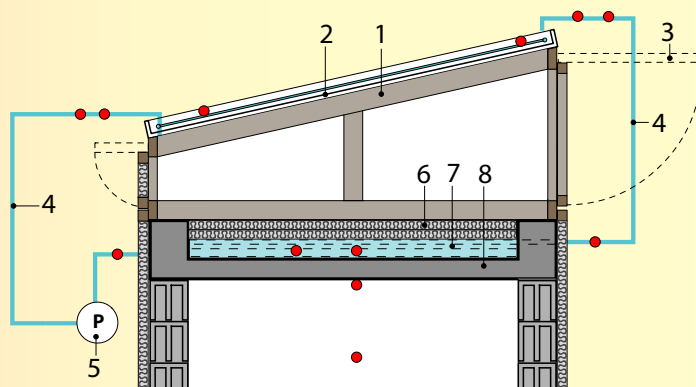
כאשר מדובר בחימום פסיבי של בניינים, מקור האנרגיה הוא בדרך כלל קרינת השמש. אנרגיית השמש זמינה במידה מספקת בכל אזורי הארץ, ואופן הניצול שלה דומה, בכולם.

כאשר דנים בקירור פסיבי, המצב מורכב יותר, משני טעמים:

א. האנרגיה העודפת הנמצאת בבניין כוללת **חום מוחש**, הבא לידי ביטוי בטמפרטורה של רכיבי הבניין ושל האוויר בתוכו; **וחום כמוס**, הבא לידי ביטוי בתכולת אדי המים באוויר. שיפור הנוחות התרמית יכול להיעשות על ידי הורדת הטמפרטורה, כלומר – סילוק חלק מן החום המוחש, אך בתנאים מסוימים עשויה להיות תועלת רבה מאוד גם בהפחתת הלחות. למשל, אוויר בטמפרטורה של 25 מעלות ו-75% לחות יחסית מכיל יותר חום כמוס מאשר חום מוחש.

ב. בכדי לסלק עודפי אנרגיה מן הבניין, דרוש 'אגן סביבתי' (environmental sink) מתאים, כלומר תווך אשר צפיפות האנרגיה שבו נמוכה מזו שבבניין – בין אם מדובר ברכיב החום המוחש, ובין אם מדובר בחום הכמוס. למשל: אם טמפרטורת האוויר החיצונית נמוכה מזו שבתוך הבניין, ניתן לקרר את הבניין על ידי החדרת אוויר זה לתוכו. ואכן, זוהי השיטה הפשוטה ביותר והנפוצה ביותר לקירור פסיבי – אוורור. אולם, ההבדלים המשמעותיים בתנאי האקלים בין אזורים שונים בארץ משפיעים במידה רבה על קיומו של אגן סביבתי מתאים. ישנם אזורים שבהם ניתן לקרר את הבניין למרות טמפרטורת האוויר הגבוהה, ולעומת זאת, ישנם אזורים שבהם הקירור הפסיבי אינו יעיל, למרות שהטמפרטורה של האוויר איננה גבוהה במיוחד – אבל הלחות שלו גבוהה.

על מנת לבחור את שיטת הקירור המתאימה למקום מסוים, יש אפוא להבין איזה אגן סביבתי נכון לנצל – אם ישנו כזה! בניין יכול לפלוט אנרגיה אל הסביבה באמצעות שני תהליכים פיסיקליים עיקריים: הסעה וקרינה. בנוסף לכך, ישנם מצבים שבהם ישנה תועלת בהמרת חום מוחש לחום כמוס, תהליך המוכר יותר בשם קירור באידוי.



איור 24.12. לחתך סכמתי במערכת קירור בקרינה משולבת בברכת מים רדודה על הגג.^[72]
מקרא: 1. גג עליון. 2. המקרן. 3. דלת מבודדת. 4. צינור מים. 5. משאבה. 6. בידוד צף. 7. בריכת מים. 8. גג בטון.

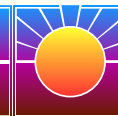
3.1. קירור בקרינה

קירור בקרינה מתרחש כאשר הבניין מאבד אנרגיה אל סביבתו בקצב העולה על הקצב שבו הוא קולט אנרגיה ממנה. האנרגיה הנפלטת מן הבניין היא בתחום האינפרא אדום (גלים ארוכים), והיא איננה נראית בעין האנושית. האנרגיה הנבלעת על ידי הבניין באה משני מקורות:

- אנרגיית שמש (בגלים קצרים, אשר כחצייה בתחום הנראה)
- אנרגיה הנפלטת ממשטחים שונים בקרבת הבניין, כגון הקרקע או קירות בניינים שכנים, ומן האטמוספירה (בגלים ארוכים)

בליעת האנרגיה האינפרא אדומה מן הסביבה מתרחשת כל שעות היממה. האנרגיה הנפלטת מן הבניין בגלים ארוכים והאנרגיה הנבלעת על ידו באותם אורכי גל הם בעלי סדר גודל דומה. קרינת השמש, לעומת זאת, עשויה להיות בעוצמה גבוהה פי שניים או אף פי שלושה מהקרינה האינפרא אדומה, אך היא מתקבלת רק בשעות היום, ובעיקר בשעות הצהריים. מאחר ובשעות אלו שטף הקרינה הנבלע בבניין גבוה בהרבה מזה הנפלט ממנו, יש צורך בבידוד תרמי רב אשר יפחית את רווח החום. קירור הבניין באמצעות פליטת קרינה אינפרא אדומה יכול להתבצע אפוא רק

72. Erell and Etzion, 1992



המסה האוגרת של המערכת: ככל שהמקרה מתקרב יותר, כך פוחת קצב פליטת החום שלו אל הסביבה. לכן רצוי שהמקרה יהיה בטמפרטורה דומה לזו של החלק החם ביותר בבניין.

• חשיפה לרוח: כל עוד המקרה חם יותר מן האוויר החיצוני, זרימת הרוח מגבירה את קצב איבוד החום, אשר תלוי בסכום של רכיב הקרינה ורכיב ההסעה. כאשר המקרה קר יותר מן האוויר החיצוני, כפי שעשוי לקרות בלילות בהירים, החשיפה לרוח גורמת למעבר חום מן האוויר אל המקרה – ובכך להקטנת יעילותו. עם זאת, נסיונות שונים להתקין יריעות הגנה בפני הרוח הנמתחות מעל פני המקרה עצמו הוכחו כבלתי יעילות, מטעמים שונים. מומלץ כי המקרה יותקן על גג עם מעקה סביבו, ללא הגנה אחרת מרוח.

• זווית הטיה כלפי האופק: מקרה המותקן בצורה אופקית חשוף אל החלק ה'קר' ביותר של השמים, הנמצא במרכז כיפת הרקיע, בדיוק מעליו, ולכן יעילותו מרבית. ככל שזווית ההטיה של המקרה ביחס לאופק גדלה, כך גדלה החשיפה שלו לאזורים חמים יותר של כיפת הרקיע ולמשטחים על פני כדור הארץ, שאף הם חמים ביחס לשמים – ולכן יעילותו פוחתת.

מערכות לקירור קרינתי של בניינים הותקנו ונוסו בהצלחה במספר קטן של בניינים ניסויים, בארה"ב ובאירופה. עם זאת, מערכות כאלה עשויות להביא תועלת רק בבניינים בהם שטח הגג גדול מאוד ביחס לנפח הבניין (בניינים חד-קומתיים), ולכן הפוטנציאל שלהן מוגבל. עם זאת, חשוב לציין כי מאחר ומערכת לקירור בקרינה יכולה לפעול במקביל לאוורור רגיל של הבניין, ולהגיע לטמפרטורות נמוכות מטמפרטורת האוויר החיצוני, הן עשויות להביא תועלת כאשר לא ניתן לסלק עודפי חום מן הבניין באמצעות אוורור בלבד.

3.2. קירור בהסעה - אוורור

לאוורור הבניין יכולות להיות מספר מטרות, כגון אספקת אוויר צח לדיירים השוהים בו. כאשר טמפרטורת האוויר מחוץ לבניין שונה מן הטמפרטורה של האוויר בתוכו, הסעת האוויר גורמת בהכרח גם למעבר אנרגיה. אם האוויר החיצוני קר מן האוויר הפנימי – הבניין מאבד אנרגיה אל הסביבה. בחורף זהו מצב לא רצוי, אולם בקיץ, אפשר למצל את הפרש הטמפרטורות – כאשר

בלילה – ובתנאי שניתן לחשוף את המסה התרמית של הבניין אל הסביבה, על ידי הסרת הבידוד התרמי או באמצעות תווך זורם אשר יוביל את האנרגיה אל מקרה מיוחד אשר ימוקם על הגג.

ההפרש בין הקרינה הנפלטת על ידי הבניין בגלים ארוכים בשעות הלילה לבין האנרגיה שהוא קולט מן הסביבה הוא לרוב קטן מאוד. גודלו תלוי בעיקר בכמות הקרינה ארוכת הגל הנפלטת על ידי האטמוספירה. כאשר השמיים מעוננים או כאשר הלחות באוויר גבוהה, פולטת האטמוספירה קרינה רבה באופן יחסי, והפוטנציאל לקירור קטן. קירור בקרינה עשוי להיות יעיל אפוא רק כאשר השמים בהירים והאוויר יבש מאוד. תנאים אלו מתקיימים בעיקר במדבר, בעוד שבמישור החוף ובצפון הארץ לא ניתן כמעט לקרר את הבניין בשיטה זו.

הקושי העיקרי ביישום מעשי של מערכת לקירור בקרינה נובע מן הצורך בבידוד תרמי על מנת למנוע מעבר אנרגיה לא רצוי בגג – בין אם בשעות היום החמות בקיץ או בשעות הקרות בחורף. מאידך, על מנת לנצל את הגג לצורך קירור הבניין בקרינה, יש צורך בחשיפת המקרה לשמים. לכך קיימים שני פיתרונות: התקנת בידוד נייד על הגג, אשר ניתן לסלקו (באמצעות מכניים) כאשר מעוניינים בקירור ולהשיבו למקומו בשאר הזמן; או שימוש בתווך זורם אשר ישמש לקישור בין המסה התרמית של הבניין לבין המקרה. תווך כזה יכול להיות אוויר, אשר בא במגע עם המקרה, מתקרב ומועבר לחלל הפנימי של הבניין, או מים.

מערכת המתבססת על מים מתוארת באיור 24.12. המים מסוחררים (בלילה בלבד) באמצעות משאבה דרך מקרנים על הגג, מתקררים על ידי פליטת קרינה אל השמים הקרים, וחוזרים אל מאגר רדוד הממוקם על הגג. מעבר החום מן הבניין אל המאגר על הגג יכול להתבצע ישירות דרך התקרה או באמצעות מחליפי חום הנמצאים בתוך החלל הפנימי או ברצפתו.

מערכות לקירור בקרינה יכולות, בתנאי אקלימים מתאימים, כגון אלו השוררים ברמת הנגב, ליצור הספק קירור של כ-100 ואט למ"ר במשך כל שעות הלילה. עם זאת, הביצועים שלהן בפועל רגישים מאוד למספר מאפייני תכנון:

• איכות הצימוד עם המסה התרמית של הבניין או עם



גם בעונות המעבר, ואורור לילה יכול להקטין מאוד את צריכת האנרגיה לקירור גם בערים כמו תל אביב או אילת, אשר בהן התועלת באורור בחודשים יולי ואוגוסט איננה רבה.

קירור בהסעה (אורור) מתבצע בפועל מבעד לפתחי הבנין – חלונות, דלתות או פתחי אורור מיוחדים. השפעתם של מאפייני הפתחים על יעילות האורור תוארה בפרק הדן במערכות זיגוג במעטפת הבנין.

3.2. קירור באידוי

קירור באורור וקירור בקרינה מביאים להפחתה בכמות האנרגיה הכוללת בבנין. קירור באידוי, לעומת זאת, אמנם מביא להורדה בטמפרטורה (כלומר הקטנת החום המוחש) – אבל במקביל מביא לעלייה בלחות האוויר הנמצא במגע עם מתקן האידוי (כלומר – הגדלת החום הכמוס שבו).

בדומה לקירור בקרינה או קירור בהסעה, גם היישום של קירור באידוי בבנינים תלוי בתנאי הסביבה. האגן הסביבתי במקרה זה, כמו בהסעה, הוא האוויר הנמצא מחוץ לבנין. אלא שכאשר מדובר באידוי, הפוטנציאל לקירור איננו תלוי רק בטמפרטורה של האוויר (הנתונה על ידי טמפרטורת הגולה היבשה שלו), אלא בתכולת אדי המים בו (המתוארת על ידי טמפרטורת הגולה הלחה). מבחינה תיאורטית, טמפרטורת הגולה הלחה היא הטמפרטורה הנמוכה ביותר אליה אפשר לצנן את האוויר על ידי אידוי מים בלבד, בתהליך אדיאבטי. מבחינה מעשית, רוב מתקני הקירור באידוי אינם מספקים אוויר בטמפרטורה זו, אלא בטמפרטורה הגבוהה ב-2-3 מעלות יותר. בהנחה שאנו מעוניינים שהאוויר המקורר יסופק לבנין בטמפרטורה של -23 מעלות לכל היותר (ורצוי אפילו פחות מכך), לא ניתן להשתמש בקירור באידוי בסביבה שבה טמפרטורת הגולה הלחה של האוויר החיצוני עולה על -21 מעלות.

הערה: המגבלה המתוארת כאן ובדוגמא המובאת בתיבת הטקסט מתייחסות רק לקירור באידוי ישיר, כגון זה הנעשה במצנן המדברי. בקירור עקיף או בקירור דו-שלבי ניתן להגיע לטמפרטורות נמוכות יותר, אולם במקרים אלו מדובר במתקני קירור שהם מכונות לכל דבר, ולא בקירור פסיבי.

הוא קיים – על מנת לסלק עודפי חום מן הבנין.

הפוטנציאל לקירור בהסעה תלוי אפוא בהפרש הטמפרטורות בין האוויר החיצוני לאוויר הפנימי, ובזמינותו. ברוב אזורי הארץ, טמפרטורת האוויר מחוץ לבנין גבוהה מן הטמפרטורה הרצויה במשך פרקי זמן משמעותיים, ובחלק מן האזורים – בכל שעות היממה. עם זאת, די בכך שטמפרטורת האוויר החיצוני נמוכה דיה במשך שעות אחדות, לרוב בשעות הלילה המאוחרות ולפנות בוקר, בכדי שאפשר יהיה להפיק תועלת מקירור באורור. זו הסיבה שהשיטה מכונה לעיתים קרובות קירור ב"אורור לילה".

למרות שמדינת ישראל משתרעת על שטח קטן מאוד, ישנם הבדלים ניכרים במהלך הטמפרטורות בין אזורים שונים בה. בהקשר הזה, חשוב לציין שני נתונים עיקריים: הטמפרטורה המרבית האופיינית לחודשי הקיץ, אשר יש לה השפעה רבה על עומס החום בשעות היום; ומשרעת הטמפרטורה היומית – ההבדל בין הטמפרטורה המרבית לטמפרטורה המזערית באותו מקום.

• בשפלת החוף, הטמפרטורה המרבית בחודשי הקיץ איננה גבוהה מאוד, בשל ההשפעה הממתנת של הים – אולם המשרעת היומית קטנה (מאותה סיבה) – ולכן הפוטנציאל לקירור באורור קטן.

• באזור הבקעה והערבה, הטמפרטורה המרבית גבוהה, ולכן נוצר עומס חום גבוה. עם זאת, למרות שהמשרעת היומית היא גבוהה – כ-12-13 מעלות – הטמפרטורה המזערית בחודשי הקיץ איננה נמוכה דיה בכדי לאפשר קירור יעיל באורור.

• ברוב חלקי הנגב (להוציא את הערבה), הטמפרטורה המרבית אמנם גבוהה, אך הטמפרטורה המזערית נמוכה במידה משמעותית ומשרעת הטמפרטורה היא כ-14 מעלות. אוויר המדבר אמנם חם יותר ביום מאשר האוויר בשפלת החוף, אך הירידה המהירה בחום אחרי השקיעה דיה בכדי לאפשר קירור יעיל באורור במשך רוב שעות הלילה.

על אף ההסתייגויות אשר צוינו למעלה בנוגע לפוטנציאל הקירור באורור באחדים מאזורי הארץ, ראוי להדגיש כי הניתוח נעשה בהתייחס לחודשי הקיץ החמים בלבד. בכל האזורים ישנו צורך בקירור הבנין



3.3.1. שיטות קירור באידוי

- קירור באידוי ישיר מתקבל כאשר המים מתאדים ישירות אל האוויר אשר מסופק לבניין. האוויר אשר מתקבל הוא אפוא לא רק קריר יותר, אלא גם לח מאוד.
- קירור באידוי עקיף נעשה כאשר האוויר המסופק לבניין מקורר באמצעות מחליף חום, אשר דרכו זורם גם אוויר אשר מקורר באידוי ישיר באופן ששני מסלולי הזרימה אינם באים במגע. האוויר המסופק לחלל הוא קריר יותר, אך תכולת אדי המים בתוכו אינה גדלה. (אם כי הלחות היחסית עולה, משום שהטמפרטורה יורדת!)
- קירור באידוי דו-שלבי נעשה במתקן אשר משלב את שני התהליכים אשר תוארו למעלה: אוויר אשר קורר בקירור עקיף מצונן עוד על ידי אידוי מים ישירות בתוכו, לפני שהוא מסופק לבניין. בשיטה זו ניתן להגיע לטמפרטורות הנמוכות ביותר.

דוגמא: האם ניתן להשתמש בקירור באידוי בעמק בית שאן?

לצורך הבדיקה נשתמש בנתוני אקלים מתחנת השירות המטאורולוגי בחפציבה (אטלס אקלימי לתכנון פסי וסביבתי בישראל, ביתן ורובין, 1994):

- טמפרטורת מקסימום חודשית ממוצעת בחודש יולי: 39.1 מעלות

- לחות יחסית ממוצעת בשעה 14:00 בחודש יולי: 35%

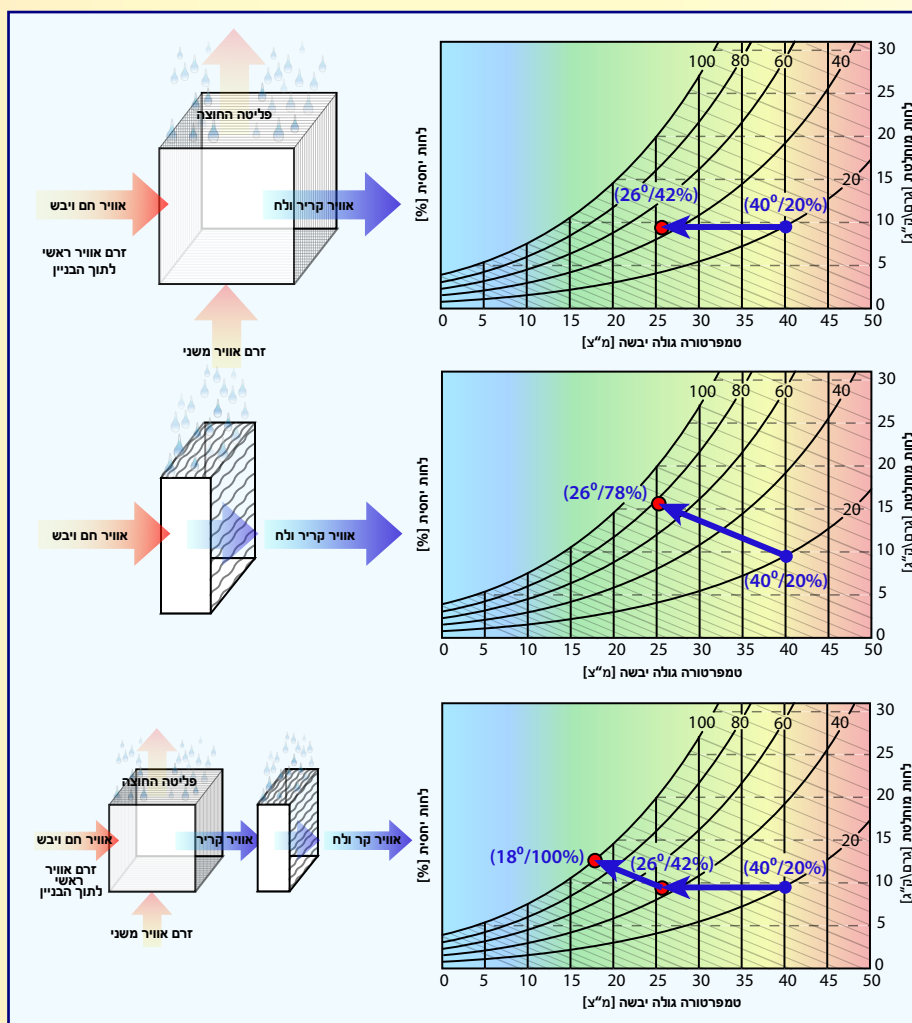
- לחץ אטמוספירי סטנדרטי ברום 80 מ' מתחת לפני הים: 102.1 קילופסקל

טמפרטורת הגולה הלחה המתקבלת בתנאים האלה היא 26 מעלות. כלומר, הטמפרטורה הנמוכה ביותר (תיאורטית!) שמתקן צינון באידוי יוכל לספק היא 26 מעלות - אך אז האוויר יהיה רווי. בפועל, האוויר שיוספק יהיה חם ב-2-3 מעלות מן הגולה הלחה, כלומר הוא יסופק ב-28-29 מעלות, בלחות של כ-85-90%.

קירור באידוי ישיר:

קירור באידוי עקיף:

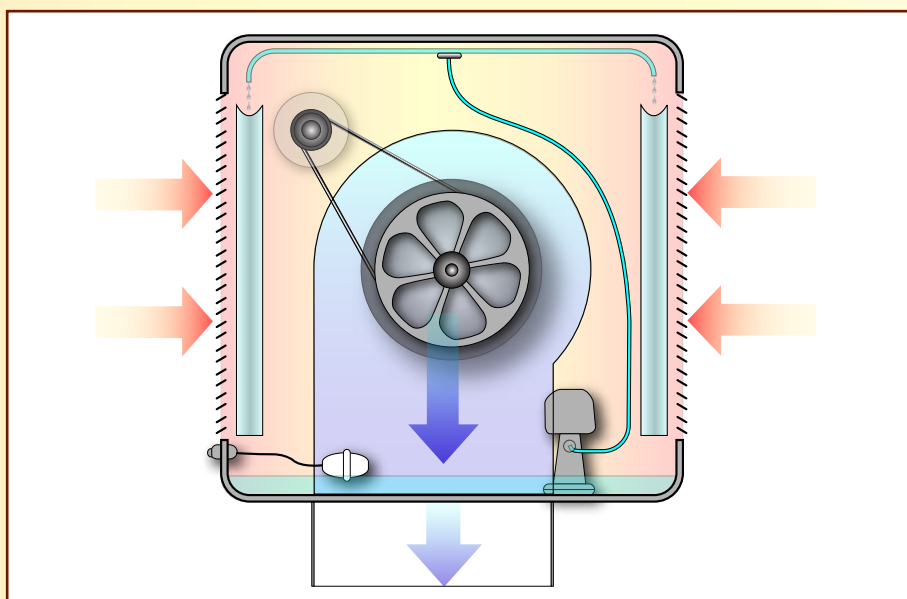
קירור באידוי משולב:





איור 24.13. מצנן מדברי מותקן על הדופן החיצונית של בניין.

אינם תורמים כלל לנוחות התרמית. זאת משום שכאשר אוויר מתוך החלל מצונן באופן רצוף על ידי אידי מים, תכולת אדי המים עולה מעל התחום אשר בו עדיין ניתן לחוש בנוח. שימוש רצוף במתקנים מעין אלה יוצר שילוב של טמפרטורה גבוהה מדי ולחות גבוהה – ולכן עומס חום גבוה.



איור 24.14. חתך עקרוני במצנן מדברי. אויר חם ויבש נכנס מצד שמאל ומצד ימין ועובר דרך מזרונים לחים, ואויר מצונן יוצא מלמטה אל תוך הבנין.

קירור באידי עקיף וקירור באידי דו-שלבי דורשים מפוחים ומחליפי חום, ואף כי הם משמשים בבניינים לא מעטים בארץ, לא ניתן לסווג אותם כקירור פסיבי, ולפיכך הדיון בהמשך לא יעסוק במתקנים מסוג זה.

3.3.2. מצנן מדברי

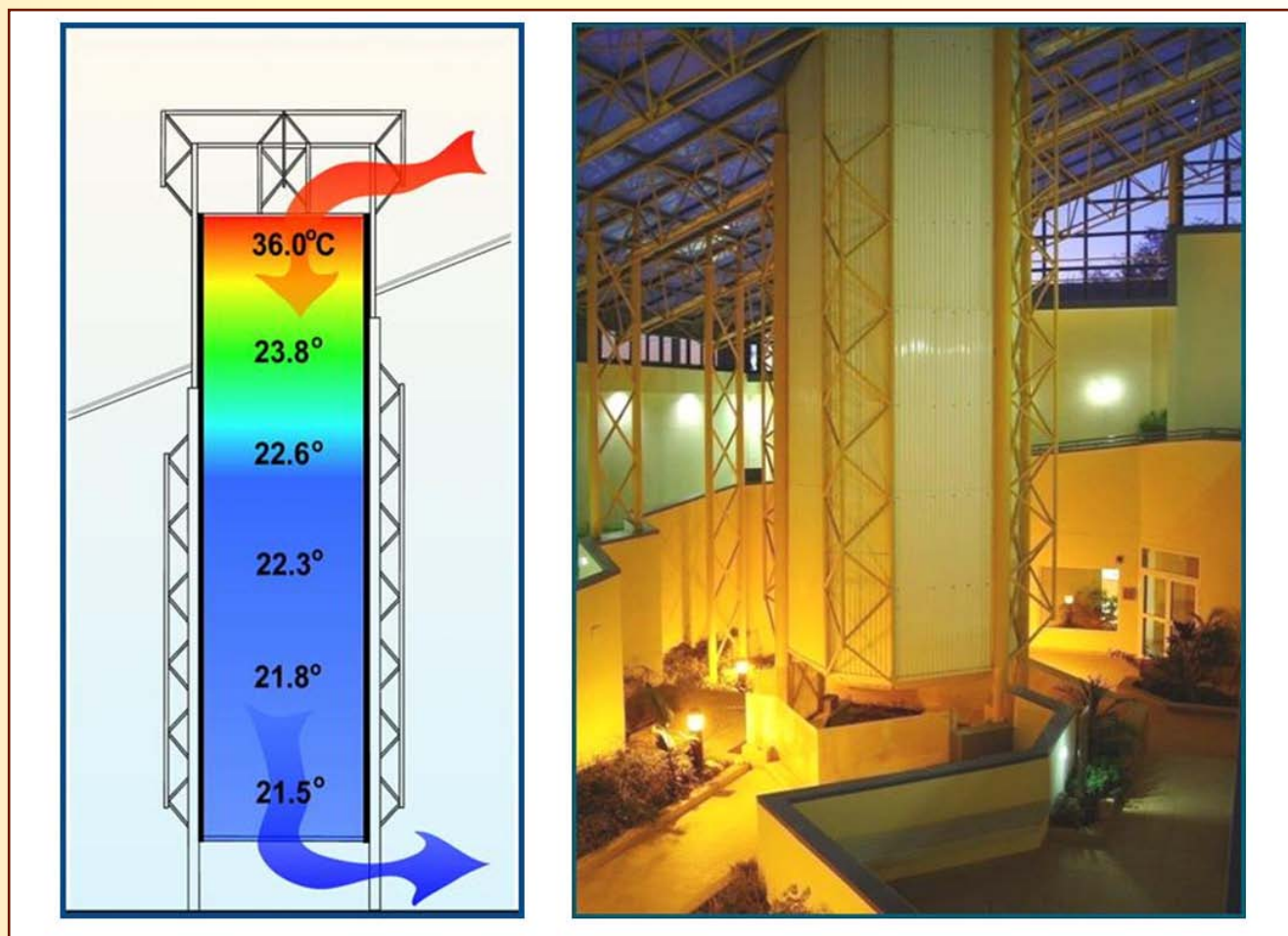
מתקן פשוט לקירור באידי, המכונה מצנן מדברי (איור 24.13), היה נפוץ מאוד בנגב עד לפני שנים אחדות, אולם לאחרונה נדחק בידי המזגנים. כיום ניתן למצוא מצננים מדבריים בעיקר במחסנים ובבתי מלאכה.

איור 24.14 מראה חתך עקרוני במצנן מדברי: האוויר המסופק לבניין נשאב באמצעות מפוח ומצונן כאשר הוא בא במגע עם הדפנות הלחות של המתקן. הדפנות, אשר עשויות חומר נקבובי וסופג (בדרך כלל צלולוזה), מורטבות באמצעות משאבה קטנה. עודפי המים נאספים בתחתית המיכל ומסופקים שוב לדפנות באמצעות המשאבה.

עלות התפעול של מצנן מדברי נמוכה יותר מזו של המזגן, והוא יכול לספק כמויות גדולות של אוויר מצונן. עם זאת, לא ניתן למעשה לשלוט בטמפרטורה של האוויר המסופק, והיא תלויה בטמפרטורת הגולה הלחה של האוויר החיצוני. חשוב לציין כי פעולתו התקינה של מצנן מדברי מבוססת על צינון אוויר חיצוני

חם אך יבש מאוד, ואספקתו לחלל הפנימי. מאחר ולא ניתן לצנן אותו לטמפרטורה נמוכה כדוגמת זו המושגת באמצעות מזגן, יש צורך לספק נפח אוויר גדול יותר. בהתאם לכך יש צורך להשאיר פתח גדול דיו לשחרור אוויר מתוך החדר אל הסביבה, בספיקה הדומה לזו של האוויר אשר מספק המצנן.

בשנים האחרונות משווקים גם מצננים מדבריים 'ביתיים': מתקנים קטנים וניידים אשר מוצבים בתוך החלל המקורר ולא מחוץ לו. משום כך, יעילותם פחותה, ובשימוש מוגבר הם



איור 24.15. חמגדל הקירור בבניין המינהלה של המכונים לחקר המדבר בקריית שדה בוקר של אוניברסיטת בן גוריון. מימין – מראה כללי של המגדל מתוך החצר הפנימית בבניין. משמאל – מפל הטמפרטורות בתוך המגדל ביום קיץ חם ויבש.

3.3.3. מגדלי צינון

$$w = (2gz \frac{T_e - T_p}{T_e})^{1/2}$$

w - מהירות זרימה אנכית [מטר/שנייה]

g - תאוצת הכובד [מטר/שנייה²]

z - הבדל הגובה [מטר]

T_e - טמפרטורת הסביבה [קלווין]

T_p - טמפרטורת האוויר המקורר [קלווין]

מבחינה מעשית, הפרש הגובה הדרוש על מנת לקבל זרימה משמעותית הוא כ-10 מטרים לפחות – בהנחה שההתנגדות האוירודינמית של המגדל ושל החלל אליו מסופק האוויר קטנים מאוד.

במצנן מדברי, זרימת האוויר נוצרת באמצעות מפוח חשמלי, ולכן המערכת איננה פסיבית לחלוטין. ניתן לקבל זרימה טבעית של אוויר באמצעות מגדל קירור. שלא כמו במגדלי הקירור התעשייתיים, במגדל פסיבי זרימת האוויר מתרחשת מלמעלה כלפי מטה, והיא תוצאה של שני מנגנונים:

א. כאשר מאדים מים באוויר יבש (למשל באמצעות מתזים, מערפלים או מזרון לח) האוויר מתקרר – אך גם נעשה צפוף יותר. כאשר המגדל גבוה מספיק, הפרש הלחצים בין חלקו העליון אשר בו מאדים את המים לבין האוויר החם בסביבה גדול מספיק בכדי ליצור שקיעה. מהירות הזרימה נתונה על ידי הנוסחה הבאה:



איור 24.16. מגדלי אידיו בהם המים מסופקים באמצעות מזרון לח. מרכז מבקרים בפארק הלאומי ציון, ארה"ב.



איור 24.17. מגדלי קירור עם מערכת אספקת מים באמצעות מערפלים. תערוכת אקספו 1992, סביליה, ספרד.

מקטינה מאוד את זרימת האוויר, בשל ההתנגדות האוירודינמית שלהם. מאידך, הריסוס בטיפות מים אינו מבטיח אידיו מוחלט בכל תנאי מזג האוויר, כך שדרושה מערכת בקרה אשר תווסת את כמות המים המסופקת בהתאם לכושר האידוי של האוויר. אם בתחתית המגדל ישנה בריכת מים, ניתן להסתפק באידוי חלקי של המים, ולרסס טיפות גדולות יותר. את המים העודפים הנקווים בבריכה ניתן להזין שוב למתזים באמצעות משאבת סחרור.

73. Pearlmutter et al., 1996

ב. זרימת הרוח סמוך לפתחו העליון של צינור אנכי יוצרת כוחות יניקה כלפי חוץ, אשר מסייעים בפליטת העשן מארובה, למשל. מאידך, התקנת כונס רוח מתאים יכולה לא רק למנוע את היניקה כלפי חוץ, אלא לתעל חלק מהרוח פנימה וליצור זרימה כלפי מטה.

תכנון הכונס מחייב היכרות עם משטר הרוחות המקומי, בכדי שפתחו יהיה מופנה לעבר הרוח השלטת. ניתן אמנם לבנות כונס מתכוונן, אך התועלת שבכך קרוב לוודאי שאיננה מצדיקה את העלות הכספית הנוספת. התכנון המומלץ לכונס קבוע מתבסס על משטח קעור אשר מטה את זרימת הרוח האופקית בראש המגדל כלפי מטה באופן מיטבי. גיאומטריה זו מתאימה לשימוש גם כאשר במגדל מותקן מפוח אשר מאפשר להגביר את קצב יניקת האוויר כאשר אין רוח. בכל מקרה רצוי להימנע משימוש ברפפות מטיפוסים שונים, משום שהן בולעות חלק מן האנרגיה הקינטית של הרוח ומקטינות את היעילות של הכונס.^[73]

מגדלי הקירור נבדלים ביניהם באופן אספקת המים לאוויר: אם דרוש אידיו מוחלט של המים, ניתן להעביר את האוויר דרך מזרונים לחים, בדומה למצנן המדברי, או לספק אותם באמצעות מערפלים היוצרים ענן של טיפות קטנות מאוד, אשר מתאדות לגמרי לפני שהן מגיעות לתחתית המגדל. החדרת האוויר דרך מזרונים



איור 24.18. הכונס בראש מגדל הקירור בבניין המינהלה, המכונים לחקר המדבר, קריית שדה בוקר של אוניברסיטת בן גוריון.



25. בניין הדגמה באקלים מדברי



איור 25.1. בניין המנהלה: מבט מכיוון דרום-מערב.

השמש בזויות גבוהות והעבירו פנימה את רוב הקרינה בזויות נמוכות. התפקוד ה"סלקטיבי" הזה הפך את החלל לחממה בחורף ולחצר מוצלת בקיץ. עקב התיישנות ושחיקת החומר וירידה בתפקוד האופטי שלו, הקירו הוחלף ב-2007 ובמקום לוחות הפוליקרבונאט הותקנה מערכת "דינאמית" אשר משלבת שני חומרים. הקירו עצמו עשוי מזכוכית שכבות בעלת גוון בינוני, ומתחת לזכוכית ישנה מערכת של רשתות צל קלות עם ציפוי רפלקטיבי בצד העליון. את הרשתות ניתן לפרוס בקיץ כדי להחזיר את רוב קרינת השמש דרך הזכוכית, ולאסוף בחורף כדי לאפשר קליטת שמש וחימום סולרי של החלל.



איור 25.2. מבט מכיוון צפון-מזרח.

בנין מנהלה - המכונים לחקר המדבר

תכנון: היחידה לאדריכלות מדברית, המכונים לחקר המדבר, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב (תכנון ההסבה: אדרי יאיר עציון)

פרויקט ייחודי זה מדגים את האפשרויות של תכנון ביו-אקלימי באזור מדברי. הבניין ממוקם במדרשת בן-גוריון, בקרית שדה בוקר של אוניברסיטת בן-גוריון בנגב.

הבניין נבנה ב-1989 כמרכז אקדמי רב-שימושי ובו חדרי כיתות, מעבדות, מגורי סטודנטים ושירותים נלווים, בשטח בנוי של כ-800 מ"ר. בשנת 2007 הוא עבר הסבה לבניין מנהלה ראשי של המכונים לחקר המדבר. בייעודו החדש הבניין כולל משרדי הנהלה, בנוסף לספריה ולאטריום המרכזי הקיימים.

האקלים המקומי מתאפיין בתנודות טמפרטורה חדות בין יום ולילה, ובין קיץ לחורף. תוך התחשבות בתנאי האקלים ה"קיצוניים" האלה, שולבו רעיונות שונים ומערכות מיוחדות בתכנון האדריכלי. הפרויקט כולל תוכנן כמבנה שמאורגן סביב חצר פנימית, ומחבר בין שבילים להולכי רגל שחוצים את הקמפוס. החצר המקורה מתפקדת כחממה בחורף וכ"נווה מדבר" בקיץ, וזה כדי ליצור מיקרו-אקלים נוח במשך כל השנה תוך חסכון מרבי באנרגיה.

החצר וחלק מהמבנה סביבה משוקעים מתחת לפני הקרקע, בעוד החזית הצפונית וחלקים מהחזיתות המזרחית והמערבית מכוסים בסוללות עפר עד למחצית גובה הבניין. כל הקירות של מעטפת הבניין בנויים משכבה של 20 ס"מ בטון או בלוקי בטון, עם ציפוי חיצוני אחיד של 5 ס"מ פוליסטירן מוקצף (קלקר). שילוב חומרים אלה, יחד עם חיפוי האדמה, מעניקים לבניין קיבול חום גבוה ובידוד טוב למסה התרמית, המייצבים את תנודות הטמפרטורה הרחבות בחוץ.

הקירו המקורי של החצר (שהותקן ב-1989) היה עשוי מלוחות פוליקרבונאט שקופים מסוג "סלקטוגל", שבזכות החתך הפריזמטי שלהם, החזירו את רוב קרני



איור 25.4. מגדל הקירור באידוי.

באמצעות "מגדל קירור באידוי" בגובה של שלוש קומות הממוקם במרכז החצר. אוויר חיצוני חם ויבש עובר דרך מערכת של מתזי מים בראש המגדל, ואידוי המים גורם לקירור האוויר. עקב צפיפותו הגבוהה, האוויר הקריר צונח אל תחתית המגדל ומתפזר בחלל. טיפות המים שאינן מתאדות נופלות ונאספות בתוך בריכה שממוקמת מתחת למגדל, ועודפי המים מסוחררים בחזרה למתזים (איורים 25.4 ו-25.5).

על פי מדידות בחצר, האוויר נשמר בעזרת הקירור באידוי בטמפרטורה אופיינית של 23-24 מ"צ בכל שעות היום בקיץ, כאשר בחוץ שוררת טמפרטורה של 34 מ"צ ויותר. כפי שרואים באיור 25.7, טמפרטורה זו בתוך החלל מתקרבת לטמפרטורת גולה לחה, אשר מייצגת את הירידה המרבית שניתן להשיג באמצעות קירור באידוי. מגדל הקירור מפיק יותר מ-900 קוט"ש של קירור במשך יום קיץ אופייני, וצריכת המים לצורך תפקוד כזה מסתכמת ב-1 עד 1.5 מ"ק. במחקרים שבוצעו לאחרונה, נמצא שבאמצעות שיפורים אווירודינאמיים, ניתן להגביר את מהירות הזרימה הנפחית דרך המגדל ובהתאם לשפר את יעילות הקירור.



איור 25.3. מבט מתוך החצר המקורה השקועה: תעלות אוויר בחממה לחימום בחורף, ורשתות מתחת לקירוי השקוף להצללה בקיץ.

בחורף, החימום הסולרי משרת לא רק את החממה עצמה, אלא גם את החדרים הסמוכים. אוויר בטמפרטורה גבוהה במיוחד מתרכז בחלק העליון של החממה. אוויר חם זה נשאב לתוך החדרים לצורך חימום בעזרת מפוחים חשמליים. כך בהשקעת אנרגיה קטנה יחסית (לצורך סחרור האוויר), מתקבל חימום יעיל של הבניין כולו, כאשר מקורו למעשה באנרגיית השמש. בניטור של הבניין לאחר השלמתו, נמצא שבחדרים המחוממים בדרך זו נשמרת טמפרטורה של לפחות 18 מ"צ בכל שעות היממה בחורף, ללא חימום גיבוי ממקורות אחרים.

בקיץ החצר הפנימית מוצלת, כאמור, וגם מאווררת כאשר הפתחים מתחת לקירוי בחלקו התחתון והעליון נפתחים לזרימת אוויר חופשית. בנוסף, החלל מקורר

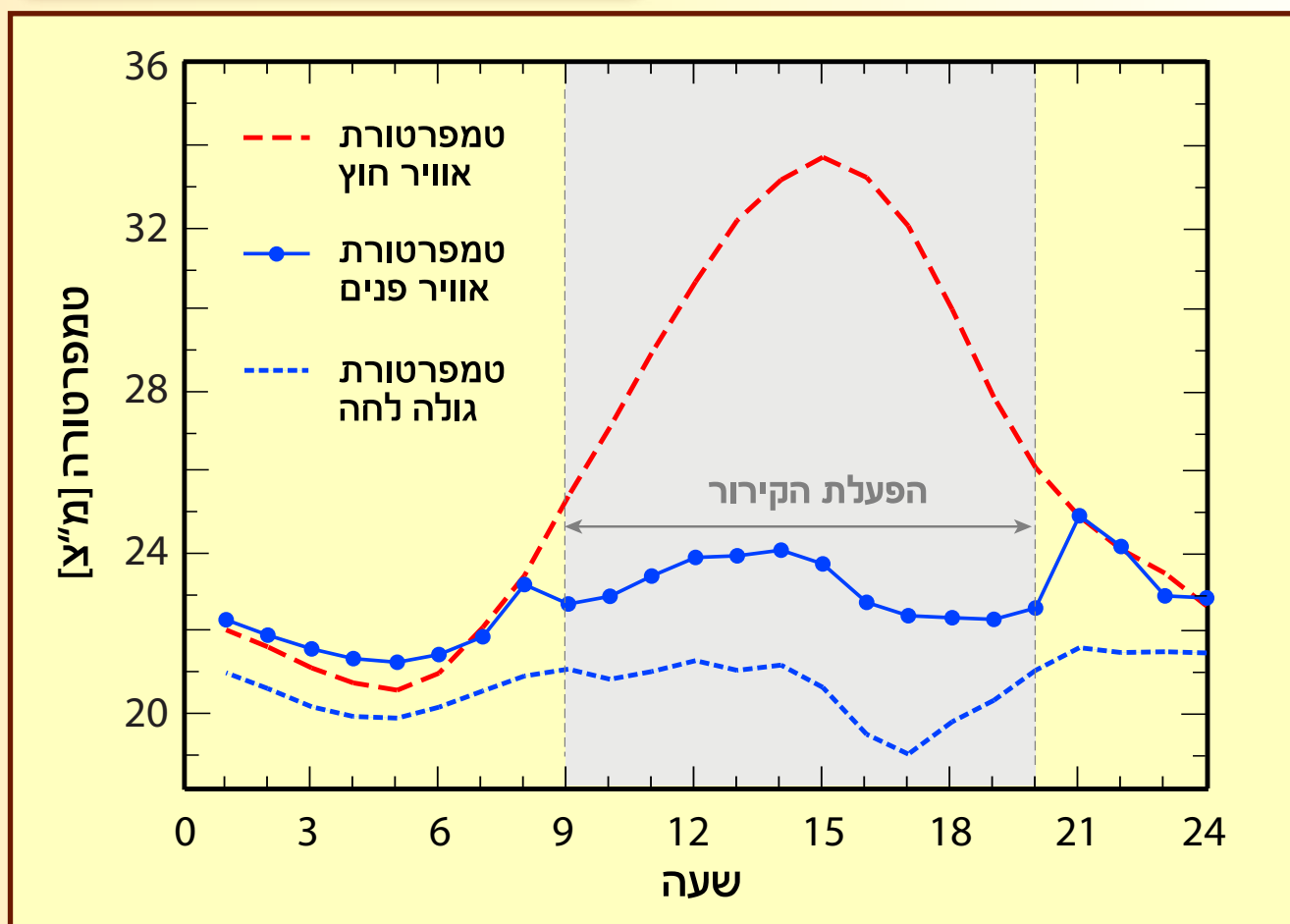


לאחר הקמת הבנין, נבדקו אמצעים שונים לשיפור התפקוד האורודינמי של מגדל הקירור.^[75,74] נמצא, למשל, שבאמצעות מפזר אויר בפתח היציאה של המגדל (בצורת משפך מעוגל הפוך) ניתן להגביר את המהירות הנפחית של הזרימה בכ-40%. כמו כן, נבדקה התרומה של פתח כניסה משנית שמאפשרת הכנסת אויר מקורר חלקית, על מנת להשיג יותר קירור בסה"כ מבלי להגדיל את כמות המים הנצרכת.

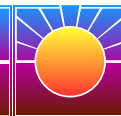
74. Erell *et al.*, 2008

75. Pearlmutter *et al.*, 2008

איור 25.6. מבט בחצר המרכזית השקועה, באזור יציאת האויר ממגדל הקירור.



איור 25.7. תפקוד הקירור באידי בום קיץ אופייני: טמפרטורת האויר הפנימי ביציאה מהמגדל, יחסית לאויר בחוץ ולטמפרטורת גולה לחה (הנמוכה ביותר שניתן להשיג על ידי אידי מים).



מקורות

מת"י (2005) ת"י 4175 חלק 1 שיטות פסיביות למדידת ריכוז גז ראדון: מבנים. תל-אביב: מכון התקנים הישראלי.

מת"י (2005א) ת"י 5281 בניינים שפגיעתם בסביבה פחותה ("בניינים ירוקים"). תל-אביב: מכון התקנים הישראלי.

מת"י (2005ג) ת"י 5282 סימון אנרגטי של בניינים. חלק 1 – דירוג בניינים לפי צריכת אנרגיה: דירות בבנייני מגורים; חלק 2 – דירוג בניינים לפי צריכת אנרגיה: בנייני משרדים. תל-אביב: מכון התקנים הישראלי.

מת"י (2009ב) ת"י 5098 תכולת יסודות רדיואקטיביים טבעיים במוצרי בנייה. תל-אביב: מכון התקנים הישראלי.

נאמן א. (2002) תאורה טבעית בבניינים. עקרונות והנחיות תכנון. ירושלים: אגף מו"פ, משרד התשתיות הלאומיות, חיפה: פקולטה לארכיטקטורה ובינוי ערים, הטכניון – מ.ט.ל.

פורשפן א., ש. רובין, י. בנימיני, ר. ובקר (2000) סיווג ישובים מעודכן לצורך בידוד תרמי לפי קריטריונים אקלימיים מוגדרים. ירושלים: משרד התחבורה (השירות המטאורולוגי) ומשרד התשתיות הלאומיות.

שביב ע., קפלוטו ג.י. (1992) קווים מנחים לתכנון אקלימי-אנרגטי של מבני מגורים באקלים ים תיכוני ממזג-קריר וחם ולח. מנהל התכנון וההנדסה, משרד הבינוי והשיכון. חיפה: מוסד שמואל מאמן והפקולטה לארכיטקטורה ובינוי ערים, הטכניון – מ.ט.ל.

שביב ע. (1998) היבטים אקלימיים-אנרגטיים בעיצוב אורבני באקלים ארץ ישראל חם ולח. משרד התשתיות הלאומיות, אגף מחקר ופיתוח. בשיתוף המרכז למחקר ופיתוח בארכיטקטורה, מעבדת אקלים ואנרגיה בארכיטקטורה, פקולטה לארכיטקטורה ובינוי ערים. חיפה: הטכניון – מ.ט.ל.

שטרן א., א. רייטר, ר. פרומקין, סגל – רעיוני, מ. טרנר (2004) מרחב ביוספרי בשפלת יהודה: שיטה, מתווה ומבנה. דו"ח מסכם. ירושלים: מנהל מקרקעי ישראל.

ביתן א., ש. רובין (1994) **אטלס אקלימי לתכנון פיסיוסביבתי בישראל**. אוניברסיטת תל אביב, משרד התחבורה (השירות המטאורולוגי) ומשרד האנרגיה והתשתית (אגף מו"פ), תל אביב: הוצאת רמות.

ברמן י., מ. דפני, ר. רייש, י. אהרוני (2008) הטמעת עקרונות לבנייה "ירוקה" ותכנון בר-קיימא במרכזי הדיור הממשלתי. דו"ח סופי – הטמעת עקרונות לבנייה "ירוקה" ותכנון בר-קיימא במסמך: אפיון הנדסי כללי לעבודות התאמה למבנה בשכירות עבור מינהל נכסי הדיור הממשלתי. נתניה וירושלים: פארטו הנדסה.

גלון י., י. הל-אור, ד. אלמליח, ד. ערן, י. יפה, ח. גבריאלי, א. הלר (1999) גידול עצי רחוב: תקצירי הרצאות וחומר עזר מיום עיון ארצי בתוספת רשימות עצי רחוב ותכונותיהם. ירושלים: המחלקה להנדסת הצומח, משרד החקלאות ופיתוח הכפר.

המשרד להגנת הסביבה. **פיתוח בר קיימא**.

המשרד להגנת הסביבה (2005) **לקראת אסטרטגיה לפיתוח בר קיימא**.

מאיר י., י. עציון, ד. פיימן (1990) **היבטים אנרגטיים בתכנון באזורים מדבריים**. הקריה בשדה בוקר: היחידה לאדריכלות מדברית והיחידה לחישובים סולאריים, המכונים לחקר המדבר, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב; ירושלים: אגף מו"פ, משרד האנרגיה והתשתית.

משהב"ש (2004) מדריך לתכנון ובניה משמרת נגר עילי. ירושלים: משרד הבינוי והשיכון, בשיתוף משרד החקלאות ופיתוח הכפר והמשרד לאיכות הסביבה.

משהב"ש (2007) עקרונות מנחים לתכנון יישובים ושכונות בנות קיימא. ירושלים: משרד הבינוי והשיכון.

משרד התחבורה (2002) הנחיות לאזורי מיתון תנועה. ירושלים: משרד התחבורה.

מת"י (2003) ת"י 1045 בידוד תרמי של בניינים. תל-אביב: מכון התקנים הישראלי. לתקן מספר חלקים: כללי, חלק 1 בתי מגורים, חלק 2 מוסדות חינוך, חלק 3 בנייני משרדים, חלק 4 בתי מלון, חלק 5 בתי חולים, חלק 10 סיווג יישובים לפי אזורי אקלים.



Alexander C. (1965) *A city is not a tree*. Originally published in: *Architectural Forum* 122(1):58-62 (Part I); 122(2):58-62 (Part II).

Alexander C., S. Ishikawa, M. Silverstein (1977) *A Pattern Language. Towns, Buildings, Construction*. New York: Oxford University Press.

Alvarez S., J. Lopez de Asiain, S. Yannas, S. de Oliveira Fernandez (1991) *Architecture and Urban Space*. Proc. 9th PLEA Int. Conf. Dordrecht etc.: Kluwer Academic Publishers.

Architecture 2030.

ASHRAE (1992) *Standard 62-1989: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.

ASHRAE (2006) *ASHRAE Green Guide. The Design, Construction and Operation of Sustainable Buildings*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Amsterdam etc.: Elsevier/Butterworth-Heinemann.

Bachmann M.O., J.E. Meyers (1995) Influence on Sick Building Syndrome symptoms in three buildings. *Social Science and Medicine*, 40(2):245-251.

Baker N., K. Steemers (2000) *Energy and Environment in Architecture*. London: E&FN Spon.

Becker R., I. Goldberg, M. Paciuk (2007) Improving energy performance of school buildings while ensuring indoor air quality ventilation. *Building and Environment*, 42:3261-3276.

Behling S. (1996) *Sol Power: The Evolution of Solar Architecture*. Munich: Prestel.

Berman A. (2001) *The Healthy Home Handbook*. London: Frances Lincoln.

BREEAM (2007) *Code for Sustainable Homes. Technical Guide*. London: Dept. for Communities and Local Government.

Bruntland G. (ed.) (1987) *Our Common Future: The World Commission on Environment and Development*. Oxford: Oxford, Oxford University

Press.

Calthorpe P. (1993) *The Next American Metropolis*. Princeton, NJ: Princeton Architectural Press.

Cervero R. (1998) *The Transit Metropolis: A Global Inquiry*. Washington, DC: Island Press.

Clark G., P. Berdahl (1980) Radiative cooling: Resource and applications. Proc. 5th Nat. Solar Conf., Amherst, MA, 20-22 October 1980.

Erell E., Y. Etzion (1992) A radiative cooling system using water as a heat exchange medium. *Architectural Science Review*, 35(2):39-49.

Erell E., Y. Etzion Y., N. Carlstrom, M. Sandberg, J. Molina, I. Maestre, E. Maldonado, V. Leal, O. Gutschker (2004) SOLVENT: Development of a reversible solar-screen glazing system. *Energy and Buildings*, 36:468-480.

Erell E., D. Pearlmutter, Y. Etzion (2008) A multi-stage down-draft evaporative cool tower for semi-enclosed spaces: Aerodynamic performance. *Solar Energy*, 82(5):420-429.

Erell E., H. Tsoar (1999) Spatial variations in the Aeolian deposition of dust – The effect of a city: a case study in Be'er Sheva, Israel. *Atmospheric Environment*. 33:4049-4055.

Ewing R., R. Cervero (2001) Travel and the built environment: A synthesis. *Transportation Research Record*, 1780:87-114.

Ewing R., K. Bartholomew, S. Winkelman, J. Walters, D. Chen (2007) *Growing Cooler: The Evidence on Urban Development and Climate Change*. Washington, DC: ULI-The Urban Land Institute.

Givoni B. (1976) *Man, Climate and Architecture*. New York: Van Nostrand Reinhold.

Givoni B. (1998) *Spatial Climate Considerations in Building and Urban Design*. New York: Wiley & Sons.

Golany G. (ed.) (1980) *Housing in Arid Lands*. London: The Architectural Press; and New York: Halstead Press/John Wiley & Sons.

Goulding J.R., J.O. Lewis, T.C. Steemers, eds. (1992) *Energy Conscious Design*. London: Batsford.



Goulding J.R., J.O. Lewis, T.C. Steemers, eds. (1992) *Energy in Architecture*. London: Batsford.

Hagishima A., J. Tanimoto (2003) Field measurements for establishing the convective heat transfer coefficient at building surfaces. *Building and Environment*, 38:873-881.

Heath G.A., M.J. Mendell (2002) Do indoor environments in schools influence student performance? A review of the literature. *Proc. Indoor Air 2002 Int. Conf.*, pp.802-807.

Hillier B. (1996) *Space Is the Machine*. Cambridge: Cambridge University Press. Available at: <http://eprints.ucl.ac.uk/3851/> (last accessed June 30, 2010).

Holzberlein T. (1979) Don't let the trees make a monkey of you. *Proc. 4th Passive Solar Conf.* Kansas City, MI, Oct. 3-5, 1979, pp.416-419.

Hawken P., A. Lovins, L.H. Lovins (2003) *Natural Capitalism*. Rocky Mountain Institute, CO.

Huberman N., D. Pearlmutter (2008) A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert. *Energy and Buildings* 40:837-848.

Hyde R. (2000) *Climate Responsive Design*. London: E&FN Spon.

IEA (2008) *Energy Efficiency Requirements in Building Codes, Energy Efficiency Policies for New Buildings*. IEA Information Paper. Paris: International Energy Agency.

Jacobs J. (1961) *The Death and Life of Great American Cities*. New York: Random House Inc.

Jagemar L., N. Fransson (2004) Users' perceptions – experiences from Swedish and Danish office buildings. *Closing the Loop: Post-Occupancy Evaluation: The Next Steps*. Network for Comfort and Energy Use in Buildings (NCEUB), Cumberland Lodge Conf. Cent., Windsor, UK, (Proc. on CD).

Kivisto T. et al. (1980) *Town Planning and Building Costs of Residential Areas*. Report 31. Espoo: Technical Research Centre of Finland, Lab. of Land Use.

Knowles R.L. (1974) *Energy and Form: An Ecological Approach to Urban Growth*.

Cambridge: MIT Press.

Kut D., G. Hare (1980) *Passive Solar Building Design*. Barking: Applied Science Publishers.

Leather P., D. Beale, L. Sullivan (2003) Noise, psychological stress and their interaction in the workspace. *Journal of Environmental Psychology*, 32:213-222.

Leyster J.L., A.C. Boerstra (2003) Comparison of productivity and absenteeism effects of indoor environmental quality in offices. *Proc. HB 2003 Int. Conf.*, pp.318-323.

Llewelyn-Davies (2000) *Urban Design Compendium*. London: English Partnerships.

Liu B.Y.H., R.C. Jordan (1960) The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 4(3): 1-19.

Lynch K., G. Hack (1973) *Site Planning*. Cambridge and London: MIT Press.

Matthiessen L.F. and P. Morris (2004) *Costing Green: A Comprehensive Cost Database and Budgeting Methodology*. Davis Langdon.

Madhavi A., U. Unzeitig (2005) Occupancy implications of spatial, indoor-environmental, and organizational features of office spaces. *Building and Environment*, 40:113-123.

Martin L., L. March (1972) *Urban Space and Structure*. Cambridge: Cambridge University Press.

McCartney K.J., Humphreys M. (2002) Thermal comfort and productivity. *Proc. Indoor Air 2002 Int. Conf.*, pp.822-827.

Marshall S. (2005) *Streets and Patterns*. London and New York: Spon Press.

Meadows D.H., D.L. Meadows, J. Randers and W.W. Behrens III (1972) *Limits to Growth*. Washington DC: Potomac Associates.

Meadows D., J. Randers and D. Meadows (2004) *Limits to Growth: The 30 Year Update*. London: Earthscan, and Chelsea Green Publishing Company, Revised Edition.

Meir I.A., Y. Etzion and D. Faiman (1990) *Energy*



Aspects of Design in Arid Zones. Sede Boqer Campus: Blaustein Institute for Desert Research, Ben-Gurion University; and Jerusalem: Israel Ministry of Energy and Infrastructure. Available in Hebrew at:

<http://www.mni.gov.il/mni/he-il/Energy/EnergyConservation/ECexpert/ECPlansDesert.htm> (last accessed 30 June, 2010).

Meir I.A., I. Gilead (2002) Underground dwellings and their microclimate under arid conditions. In GRECO & ACAD (ed's) Design With the Environment. Proc. 19th PLEA Int. Conf. Toulouse. Vol.2, pp.618-624.

Meir I.A., D. Pearlmutter, Y. Etzion (1995) On the microclimatic behavior of two semi-enclosed attached courtyards in a hot dry region. *Building and Environment*, 30(4):563-572.

Mitchell D. (1974) Convective heat transfer from man and other animals. In: Monteith J.L., L.E. Mount (eds). *Heat Loss from Animals and Man: Assessment and Control*. London: Butterworths, pp.59-76.

Mazria E. (1979) *The Passive Solar Energy Book*. Emmaus Pa: Rodale Press.

Newman O. (1973) *Defensible Space*. London: Architectural Press.

Newman P., J. Kenworthy (1999) *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*. Washington, DC: Island Press.

Niemelae R., O. Seppanen, K. Reijula (2003) Prevalence of SBS-symptoms as an indicator of health and productivity in office buildings. Proc/ HB 2003 Int. Conf., pp.251-256.

Nishihara N., Y. Yamamoto, S. Tanabe (2002) Effects of thermal comfort on productivity evaluated by task performances, fatigue feelings and cerebral blood oxygenations changes. Proc. Indoor Air 2002 Int. Conf., pp.828-833.

Oke T.R. (1987) *Boundary Layer Climates*. London and New York: Methuen.

Olgyay V. (1963) *Design with Climate*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Oliver P. (2007) *Dwellings: the Vernacular House Worldwide*. London: Phaidon Press.

Pearlmutter D., P. Berliner, E. Shaviv (2005) Evaluation of urban surface energy fluxes using an open-air scale model. *Journal of Applied Meteorology*, 44(4):532-545.

Pearlmutter D., P. Berliner, E. Shaviv (2006) Physical modeling of pedestrian energy exchange within the urban canopy. *Building and Environment*, 41(6):783-795.

Pearlmutter D., P. Berliner, E. Shaviv (2007a) Integrated modeling of pedestrian energy exchange and thermal comfort in urban street canyons. *Building and Environment*, 42(6):2396-2409.

Pearlmutter D., P. Berliner, E. Shaviv (2007b) Urban climatology in arid regions: Current research in the Negev desert. *International Journal of Climatology*, 27(14):1885-1875.

Pearlmutter D., E. Erell, Y. Etzion (2008) A multi-stage down-draft evaporative cool tower for semi-enclosed spaces: Experiments with a water spraying system, *Solar Energy*, 82(5):430-440.

Pearlmutter D., E. Erell, Y. Etzion, I.A. Meir, H. Di (1996) Refining the use of evaporation in an experimental down-draft cool tower. *Energy and Buildings*, 23(3): 191-197.

Pearson D. (1989) *The Natural House Book*. London: Gaia Books.

PedShed (2006) *Walkable Urban Design and Sustainable Placemaking*. <http://pedshed.net/?p=9> (last accessed June 30, 2010).

Peeters A., I.A. Meir (2003) More than a hole in the ground? Fusing object and context in subterranean architecture. *Open House International*, 28(3):34-48.

Ratti C., D. Raydan, K. Steemers (2003) Building form and environmental performance: Archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and Buildings*, 35(1):49-59.

Retzlaff R.C. (2008) *Green Building Assessment Systems. A framework and comparison for*



planners. Journal of American Planning Association 74(4): 505-519.

Roaf S., D. Crichton, F. Nicol (2005) Adapting Buildings for Climate Change. Oxford: Architectural Press.

Salingaros N. (2005) Principles of Urban Structure. Amsterdam: Techne Press.

Schweitzer O., Y. Waisel, E. Erell (2010) Evaluation of green roofs in a water-scarce environment. Proc. 3rd PALENC Int. Conf. Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment. Rhodes, Greece, Sept.29-Oct.1, 2010.

Space Syntax Laboratory (2003) **Housing and Crime: The space syntax online database of crime and space studies.**

Spengler J.D., J.M. Samet, J.F. McCarthy (2000) Indoor Air Quality Handbook. McGraw-Hill: McGraw-Hill.

Southworth M., E. Ben-Joseph (2003) Streets and the Shaping of Towns and Cities. Washington, DC: Island Press.

Sustainable Measures.

Tanabe S. (2003) Productivity and fatigue. Proc. HB 2003 Int. Conf., pp.88-94.

Tham K.W., H.C. Willem (2003) A principal component analysis of perception and SBS symptoms of office workers in the tropics at two temperatures and ventilation rates. Proc. HB 2003 Int. Conf. pp.98-103.

USA (2008) Federal research and development Agenda for Net-Zero Energy, High-Performance Green Buildings. Report to the Subcommittee on Buildings Technology research and Development. National Science and Technology Council, Committees on Technology.

USGBC (2005) LEED-NC. Green Building Rating System for New Construction and Major Renovations. Version 2.2. U.S. Green Building Council.

Veitch J.A., G.R. Newsham (2000) Exercised control, lighting choices, and energy uses: an office simulation experiment. Journal of

Environmental Psychology, 20:219-237.

Vincent D., I. Annesi, B. Festy, J. Lambrozo (1997) Ventilation system, indoor air quality and health outcomes in Parisian modern office workers. Environmental Research, 75(2):100-112.

Watson D., K. Labs (1983) Climatic Design – Energy Efficient Building Principles and Practices. New York: McGraw-Hill Book Company.

אתרי אינטרנט רלוונטיים

היחידה לאדריכלות ובינוי ערים במדבר, המחלקה לאדם במדבר – המכונים לחקר המדבר ע"ד בלאושטין, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב -

<http://www.bgu.ac.il/CDAUP>

<http://ilgbc.org> -- המועצה הישראלית לבנייה ירוקה - המשרד להגנת הסביבה -

<http://www.sviva.gov.il/bin/en.jsp?enPage=HomePage>

המרכז למחקר ופיתוח בארכיטקטורה, הפקולטה לארכיטקטורה ובינוי ארים, הכאניון -

http://architecture.technion.ac.il/hebrew_research.php?pi=155

חיים וסביבה: ארגון גג של שוחרי איכות החיים והסביבה - <http://www.sviva.net>

<http://www.sii.org.il> - מכון התקנים הישראלי -

<http://www.mof.gov.il> - משרד האוצר -

משרד הבינוי והשיכון -

<http://www.moch.gov.il/moch>

<http://www.pnim.gov.il> - משרד הפנים -

<http://www.mni.gov.il> - משרד התשתיות הלאומיות - עמותת ישראלית לייזום בנייה ירוקה ובת קיימא -

<http://www.iisbeisrael.org>

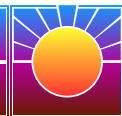
ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers - <http://www.ashrae.org/>

BREEAM – Building Research Establishment (BRE) Environmental Assessment Method - <http://www.breeam.org/>

iiSBE – International Initiative for a Sustainable Built Environment - <http://www.iisbe.org/>

ISIAQ – International Society of Indoor Air Quality and Climate - <http://www.isiaq.org/>

USGBC – U.S. Green Building Council - <http://www.usgbc.org/>



מפתח

זרימה (טורבולנטית) 33	אגירה תרמית 132-131,128,101,98,89
זרימה (למינרית) 33	אזורי אקלים 93,11-9
חדירת אוויר (אינפילטרציה) 125-124,97-96,61,32	אי החום העירוני 104,75,14-13
חום כמוס 138,42,35-34,15	אי נוחות, מקדם 23
חום מוחשי 138,35-34,32,15	אידוי 66-65,42-41,34,23,17,14,9
חום סגולי 35,31-30	אידוי-דיות 106-105,55,14
חימום סולרי 145,137-128,70	אלבדו (מקדם החזרה) 107
חממה 146-145,137-136,63	אנתלפיה 35-34
חממה (אפקט) 7	בידוד תרמי 96-92,90-89,28,10-9
חממה (גזי) 83,51,48,7	בליעה, מקדם 117,108,102-101,91,27-26
טבלה פסיכרומטרית 34,28,21	ברונטלנד, דו"ח 3-4
טמפרטורה אופרטיבית 23-22	גאומטריית שמש 44-43
טמפרטורה אפקטיבית חדשה 23,21	גזרות החשיפה 38
טמפרטורה קרינתית ממוצעת 117,22	גזרת החשיפה לשמיים 58,54,40-38,13
טמפרטורת גולה יבשה 141,34,23-21	גשרים תרמיים 96-93,91
טמפרטורת גולה לחה 147-146,34	הולכה (תרמית) 51,28
טרומב, קיר (Trombe) 134,132	חופה עירונית 104,41,15,13-12
יחס גובה-רוחב (של רחוב) 60-57	החזרה 130,119,114,110,100,39-36,27-26,14
לחות יחסית 141,138,84,70,35-34,22-21,10	הסעה (תרמית) 81,54,42,40,36,32,24,23,17-16
לחות מוחלטת 141,34,22-21	138-132,121,110,108,105,103-102,88-86
לחץ אדים חלקי 34	140-139
מאזן אנרגיה 20-19	העברה, מקדם 130,110,26
מוליכות תרמית 102-101,99,93,91-89,30-28	הפנייה 101,87,13
116-115,111	הצללה 130,115-109,82,73,66-63,60,57-54,50,36
מוליכות תרמית (כוללת) 31	הצללה, מערכות 123-121
מוליכות תרמית (פנית) 33-32	הצללה, מקדם 110,38
מסה תרמית 109,100,98-97,96-89,31-30	התנגדות (תרמית) 105,103,101,96-89,30-28,10
מצב יציב 31-30	119,116
נבגים 45	התנגדות תרמית, מקדם 28
נוחות ויזואלית 121,117,115,112-111,46-45	זוית פגיעה (לקרינה) 130,110,27-26
נוחות תרמית 58-54,46-45,42-41,36,23-16,11,8	זוית פגיעה (לרוח) 125,41
138,133-132,126,124,98-97,89,83,69,67	זכויות שמש 131,82-69,67
	זרימה 127-126,102,59-54,41,40,33-32
	147-143,141,136-134



רווח אנרגיה 137,36	נפח סגולי 34
רווח חום 138,131,122,120,117,116,10	נקודץ טל 34
רווח חום סולרי (מקדם) 121,110	סטפן-בולצמן, מקדם 40-39,24
רווח סולרי 129	ערבול 15
רווח קרינתי 87	פוליאוריתן מוקצף 93-92
רום (זזית) 133	פוליסטירן מוקצף 96-95,93-92,91-90,31-29
ריבוד (תרמי) 137	145,101-99
שכבת גבול 116,92,32,30-29	פיגור זמן 135-134,101,98-97
שכבת גבול (אווירודינמית) 32	פיתוח בר קיימא 48,7-3
שכבת גבול (אטמוספרית) 12	פליטה, מקדם (אמיסיביות) 40-39,27,24
שכבת גבול (הידרו-דינמית) 32	פנות 135,129
שכבת גבול (עירונית) 12	פסיבי (חימום וקירור) 96,95,87,85,79,77,47,11
שכבת גבול (פנימית) 12	144-128,111,109,103
שליטה נתפשת 46	צפיפות (אוויר) 146,136,125,34,21
תקן ישראלי (ת"י 1045) 120,96-93,33,11-8	צפיפות (בנייה) 63,59-57,54,49,37,14-12,7
תקן ישראלי (ת"י 5281) 47,8	130,82,78-74
תקן ישראלי (ת"י 5282) 94,10,8	צפיפות (חומר) 93-89,31-29
תהליך אדיאבטי 140,34	צפיפות (חזיתית) 13
תו תקן ירוק 47	צפיפות (שטח גגות) 13
תסמונת הבניין החולה 45	קיבול חום (נפחי) 145,99,97,91-89,58,31-30,14
תריס 126,122,118,115-114,109-108,96,73	קליטה 132,131,129,128
133,131,129	קליטה (ישירה) 132,129-128,117,94,90,85,67
תרמו-סיפוני 135,132	133
	קליטה (בלתי ישירה) 135-133
	קליטה (מרוחקת) 136-135
	קרינה (אולטרה-סגולה) 136-135,133,26-25
	קרינה (אינפרה-אדומה) 138,121,110,27-25
	קרינה (אלקטרומגנטית) 25-24
	קרינה (ארוכת גל) 100-99,54,40-39,36,25,15
	139,132,117,107,105-102
	קרינה (ישירה) 101,59,40-36,15,10
	קרינה (מפוזרת) 112,57,54,40-36,16-15
	130,124-122
	קרינה (קצרת גל) 117,39,36,25
	קרינה (רדיואקטיבית) 47