

מדינת ישראל  
משרד האנרגיה והתשתית  
האגף למחקר וכיתוח



היחידה לארריכלות מדברית  
היחידה לחישובים סולאריים

המכון לחקר המדבר  
ע"ש יעקב בלאושטיין  
אוניברסיטת בן גוריון בנגב  
הקריה בשדה בוקר

# היבטים אנרגטיים בתכנון באזורים מדבריים

יצחק מאיר יאיר עציון  
דוד כיימן

מדינת ישראל  
משרד האנרגיה והתשתית  
האגף למחקר ופיתוח

## היבטים אנרגטיים בתכנון באזורים מדבריים

אדריכל יצחק מאיר, אדריכל דר' יאיר עציון, פרופ' דוד פיימן

היחידה לאדריכלות מדברית והיחידה לחישובים סולאריים  
המכון לחקר המדבר על שם יעקב בלאושטיין  
אוניברסיטת בן-גוריון בנגב  
הקריה בשדה-בוקר

לפי חוזה מס' 89-8-09

## ENERGY ASPECTS OF DESIGN IN ARID ZONES

© ARCH. I.A. MEIR, ARCH. DR. Y. ETZION, PROF. D. FAIMAN

J. BLAUSTEIN, INSTITUTE FOR DESERT RESEARCH  
BEN-GURION UNIVERSITY OF THE NEGEV  
&  
STATE OF ISRAEL  
MINISTRY OF ENERGY & INFRASTRUCTURE

May 1990

RD-04-90

אייר תש"ן

## מבוא

אזורים מדבריים מאפיינים בתנאים סביבתיים קשים יחסית: הפרשי הטמפרטורה בין יום ללילה גבוהים, הקיץ חם והחורף קר, קיימים שינויים קיצוניים בלחות היחסית, קרינת השמש היא בעלת עוצמה גבוהה, ישנן תקופות יובש ולעומתן שברי ענן הגורמים שטפונות פתאומיים. גם העדר הצמחייה, הנוף בעל הגוונים המונוכרומיים - כל אלה משפיעים על האדם ועל סביבתו המבונה. העדר מודעות לאילוצים הסביבתיים המיוחדים של המדבר עלול לגרום לתכנון בניינים ומבנים היוצרים בתוכם תנאי נוחות (תרמית ואחרת) ירודים והיוצרים, בין היתר, דרישה מוגברת בתשומת אנרגיה לשיפור המיקרו-אקלים.

משבר האנרגיה של שנות ה-70' העלה לתודעת העולם את הצורך לחסוך במקורות אנרגיה בלתי-מתחדשים. גם המודעות ההולכת וגוברת בנושאים של איכות הסביבה דגישה את הצורך בניצול יעיל יותר של המשאבים הטבעיים. בשנים האחרונות בוצעו מחקרים רבים ופותחו שיטות המאפשרות תכנון מבנים ויישובים המנצלים את נתוני הסובב הטבעי לצורך שיפור המיקרו-אקלים. נושאים אלה הינם בעלי חשיבות רבה גם למדינת ישראל, ששטח המדבר בה עולה על 65% משטחה. בעבר, תהליכי הפיתוח והבנייה באזורים המדבריים של הארץ הושפעו מאילוצים שונים שברדך כלל לא איפשרו התייחסות לבעיות אקלים. הידע שהצטבר בנושאי בנייה אקלימית והעלייה המסיבית המתדפקת על דלתינו יוצרים הזדמנות חדשה לפתח את המדבר הישראלי לסיפק צורכי האוכלוסייה, תוך חיסכון באנרגיה ותוך הפיכתה של ההתיישבות בנגב לזגם לחי קיי.

להשגת מטרת אלה חיוני להבין את הרב-גונית הטמונה במושג 'מדבר'. למרות השתייכותם לכאורה לקבוצה אחת, אזורים צחיחים מסווגים לקבוצות אקלימיות שונות, כגון חם ויבש, קר ויבש, חם ולח, כאשר כולם מאפיינים בתנאי אקלים קשים במשך חלקים ארוכים של השנה. מאחר ויכולתו הטבעית של האדם להתאים את עצמו לקיצוניות אקלימית היא מוגבלת, שמירת תנאי הנוחות התרמית בסובב המבונה באזורים אלה תלויה בתכנון מתאים ככל האפשר ובתשומת אנרגיה משלימה. שיעור תשומת האנרגיה המשלימה תלוי במידה גדולה בהתאמתו של התכנון על כל רמותיו לתנאים המקומיים - תכנון מתאים יקטין בהרבה את צריכת האנרגיה להשגת נוחות תרמית.

המדריך "היבטים אנרגטיים בתכנון באזורים מדבריים" עוסק בתכנון ובטכניקות בנייה המאפשרים חסכון באנרגיה ואשר מתאימים לאזורי הנגב השונים: חוף הנגב, שפלת הנגב, הר הנגב והערבה. המדריך כולל שלושה חלקים, כל אחד מהם עוסק ברמת תכנון שונה:

♦ החלק הראשון הוא מבוא על המדבר ועל מאפייניו השונים, על אקלים, על נוחות תרמית ועל תכנון מתאים.

♦ החלק השני של המדריך דן במבנה הבודד על מרכיביו השונים ובנושאי בידוד, מסה תרמית, חדירת שמש, חדירת אוויר ואוורור טבעי וכן במרכיבי מעטפת המבנה. כמו כן מוצגות שיטות מתמטיות ואמפיריות לחישוב, תכנון והערכת תפקודם של מרכיבי המבנה.

♦ החלק השלישי של המדריך עוסק בתחומים שונים של עיצוב עירוני, לרבות צורות שונות לתכנון מבנים ושכונות היוצרים שטחים ציבוריים מוגנים מבחינה אקלימית. חלק זה דן בין היתר בקריטריונים לבחירת אתרים, בטיפולוגיות של מבנים ושל שטחים פתוחים ובשיטות שונות להגנת הסובב המבונה מפני סופות אבק וחול, שמש, רוח וגשם.

הנספחים שבסוף המדריך כוללים נתונים על זוויות שמש, אורכי צל וסוגי צמחייה מדברית.

המדריך מעוצב בתבנית קבועה בה מחולק הדף לשלוש עמודות: טקסט, הערות - הפניות ואיורים; או לשתי עמודות: טקסט ודוגמות. תבנית זו מאפשרת הנגה טובה יותר של החומר והרקע שלו ופנייה מהירה ונוחה למקורות ולחומר קריאה נוסף.

המדריך עוסק בנושאים עיוניים (אקלים, נוחות תרמית, מושגי יסוד בבנייה אקלימית) ובנושאים תכנוניים מרמת המבנן עד לרמת פרטי הבניין. תחום עיסוקו הרחב והמגוון של המדריך מכוון להפנו כללי עזר בו ישתמשו קבוצות מקצועיות שונות: אדריכלים, מתכננים עירוניים ואזורים, קובעי מדיניות וסטודנטים.

המדריך נכתב על ידי אדריכל יצחק מאיר ואדריכל דר' יאיר עציון מהיחידה לאדריכלות מדברית ופרופ' דוד פיימן מהיחידה לחישובים סולריים שבמכון לחקר המדבר ע"ש יעקב בלאושוטין - אוניברסיטת בן-גוריון בנגב. הכנתו והוצאתו לאור של הספר מומנו על ידי האגף למחקר ופיתוח של משרד האנרגיה והתשתית, בעידודו של הממונה על המחקר והפיתוח דר' אברהם ארביב. יועצי משרד האנרגיה והתשתית לענייני מבנים אדר' נתן און-בר ואינג' נחום גרנות, ליוו את כתיבתו של המדריך מתחילתה ותרמו לעיצובו הסופי. אדריכל זניאל שן, מנהל החטיבה הטכנית במשרד הבינוי והשיכון - מחוז הדרום, תרם מניסיונו ומשיטתו במהלך הכתיבה. אנו מודים לכולם על עזרתם הרבה.

## **"מי יתנני במדבר מלון ארחים" (ירמיהו ט, א)**

מדבריות חמים דלי אוכלוסין מכסים כרבע מהשטחים היבשתיים של כדור הארץ. הנגב שלנו, המנוגב ממים (זהו אחד ממדרשי שמו) מהווה כמעט שני שלישים משטחה של מדינת ישראל שבשטחי הקו הירוק, אך מתגוררים בו רק כ-7% מתושבי המדינה.

אבל אנשים חיו וחיים במדבר, ויחיו בו כנראה במספרים הולכים וגדלים בעתיד. במדבריות יש משאבי טבע ניכרים, שניצולם יצור מקומות עבודה רבים. בנוסף, ככל שיגבר הלחץ על האיזורים המאוכלסים יותר, יגדל הצורך בניצול הנוטנציאל הטמון באיזורים מדבריים.

יש גם אנשים הנמשכים למדבר, לנופים, לשקט, לאקלים, לראשוניות שבו. עם ישראל נולד במדבר, ובמדבר עוצב חלק מאופיו.

החיים באיזור מדברי יהיו כרוכים בניצול כמויות גדולות של אנרגיה, אם רוצים לשמור על רמת חיים סבירה ומתעקשים להתעלם מהאילוצים הסביבתיים המיוחדים. אבל העולם של מחר לא ירשה בזבוז משאבים, על-מנת לאפשר פיתוח בלי להביא כלייה על משאבי טבע ולמנוע השפעות שליליות על הסביבה. אפשר להשיג זאת, ובלי לפגוע באיכות חיינו: יש רק להתאמץ ולנצל את הידע הרב שכבר צברנו.

מי שבונה במדבר כמו בצפון הירוק עושה עוול גם לעצמו וגם לטבע. באדריכלות רציונאלית, צורות הבניה משקפות לא רק את צרכי הדיירים ואת מגבלות השטח, אלא גם את זרמי האנרגיה המחזוריים של הסביבה הטבעית.

מדריך זה חובר על-ידי אנשים הנמנים עם הטובים בחוקרים שלנו בתחום, החיים במדבר, מכירים אותו ואוהבים אותו. הם היו רוצים לראות את הנגב מפותח ומיושב תוך כדי שימור יופיו וקסמו, ובלא להכביד על משאביה של המדינה יתר על מידה. אנשים אלה הם החלוצים של היום, וחלומם צריך להיות חלום כולנו.

אני מקווה שספר זה יהיה שימושי, ושהבונים (לעצמם ולאחרים, למגורים פרטיים או לתעשייה, לתיירות ולמסחר) יתחשבו באופן מירבי בשיקולים המובאים במדריך, לטובתם הם ולטובת הציבור כולו. אם בעוד שנים מספר ילד החי בנגב לא יצייר בית עם גג אדום, נדע שהצלחנו אף במעט.

ספר זה מיקדש למדבר באהבה.

**דר' אברהם ארביב**  
**מנהל האגף למחקר ופיתוח**  
**משרד האנרגיה והתשתית**

## תוכן העניינים

עמוד

1/1	חלק 1: מונחי יסוד והיבטים אנרגטיים יסודיים
2/1	חלק 2: הבניין במדבר
3/1	חלק 3: השכונה ומקבץ הבניינים
I	נספח 1: זוויות שמש
IX	נספח 2: אורכי צל
XIII	נספח 3: צמחייה
XVII	בבליוגרפיה:



# חלק 1: מונחי יסוד והיבטים אנרגטיים יסודיים

1/24	1.8	צבעהמעטפת
1/25	1.9	מקורות חום פנימיים
1/26	1.10	פתחים
1/27	1.11	הצללה
1/27	1.11.1	קרינה ישירה
1/27	1.11.2	קרינה מפוררת ומוחזרת
1/30	1.12	חדירת אוויר
1/31	1.13	נתונים אקלימיים לחישוב עומס חימום וקירור
1/31	1.13.1	טמפרטורת האוויר
1/32	1.13.2	הלחות היחסית
1/32	1.13.3	קרינת שמש

1/3	1.1	המדבר - מהו
1/4	1.2	אזורים אקלימיים בנגב
1/8	1.3	הגדרת הנוחות התרמית לפי אזורים ולפי עונות השנה
1/8	1.3.1	קביעת תנאי נוחות
1/9	1.3.2	שיטות להערכת תנאי הנוחות
1/9	1.3.3	תנאי נוחות תרמית
1/10	1.3.4	אקלים
	1.4	שיטות להשגת נוחות תרמית - חימום וקירור
1/12		(מקורות אנרגיה בלתי מתחדשים ומתחדשים)
1/12	1.4.1	מקורות אנרגיה בלתי-מתחדשים
1/12	1.4.2	מקורות אנרגיה מתחדשים (חליפיים)
1/16	1.5	בידוד תרמי
1/18	1.6	מסת הבניין
1/20	1.7	תופעות דינמיות של מסת הבניין
1/20	1.7.1	מיתון ניוד הטמפרטורה היומי
1/21	1.7.2	הזזה בזמן של טמפרטורת המקסימום/המינימום
1/22	1.7.3	עומק החזירה
1/22	1.7.4	קיבולת חום יומית
1/23	1.7.5	זמן תגובה תרמית (לשינוי פתאומי במזג האוויר)
1/23	1.7.6	מיתון באקלים הפנימי של הבניין





## 1.1 המדבר - מהו

אממירית ניתן להגדיר את המדבר כאזור צחיח שכמות המשקעים בו קטנה ופרוסה על פני השנה או על פני תקופה רב-שנתית באופן לא סדיר ומאזן המשקעים בו שלילי. כיוסי הקרקע על ידי הצומח הוא נמוך ודליל. הטמפרטורה הממוצעת גבוהה (או נמוכה) מטמפרטורה ממוצעת של אזורים סמוכים והבדלי הטמפרטורה בין יום ולילה גדולים.

קיים קושי בסיסי בהגדרת המדבר בשל המגוון הרב של אפיוניו בשטחים שונים. הגדרה מדויקת חייבת להיות רב-תחומית. הגדרה כוללתית הציעו אבן-ארי, שן ותדמור (1):

...מדבר הוא אזור שבו מדד-הלחות לפי תורנטווייט (Thornthwaite) הוא מתחת ל-40 (2) ובנוסחת האקלים של קופן (Koppen) הוא מסומן באותיות BW (3). כמות הגשמים במדבר היא זעומה ובלתי-יציבה עם מקדם השתנות של גשמים בין 5 ויותר (4). בתנאים כאלה תהיינה הקרקעות בלתי בוגרות והצמחייה, הממזגת בקרבה את כל הגורמים האלה, תהיה בהכרח דלילה, ובמדבר הקיצוני היא תתרכז בשקעים ובערוצים ובין סדקי סלעים. במדבר שכיחים מקרם מדברי (5) וריצוף מדברי (6) והסיחוי (7) בו ניכר מאוד.

מיינים שונים של צמחים ובעלי חיים הצליחו להתאים עצמם לתנאי המדבר. תוך כדי תהליכי ההתאמה נוצר מצב של שיווי משקל דינמי (שיווי משקל הנשמר על ידי התאמת המערכת לפרמטרים/מרכיבים משתנים) בין האוכלוסיות השונות לבין עצמן ובינן לבין סביבתן. זרו שיווי משקל עדין והתערבות בלתי מחושבת (ומתחשבת) עלולה לערערו ולגרום לשינויים בלתי הפיכים במערכת כולה.

1. אבן-ארי, שן, תדמור, 1980, עמ' 29.

2. מקום שבו משתווה כמות המשקעים כל העת בדיוק לכמות האידוי-דיות שבסחה (אוטרנספירציה פוטנציאלית) החמים בו זמניים במידה הדרושה, אין מחסור או עודף במים והאקלים איננו לח או יבש. ככל שהמחסור במים גדל ביחס לאידוי-דיות שבסחה, נעשה האקלים צחיח יותר והחפך. יחס זה ניתן למודד לפי נסחה א':

$$I(m) = (100S - 60D) / N \text{ כאשר:}$$

$I(m)$  = מדד לחות כללי

S = עתף מים

D = חיסר מים

N = צורך במים

פירושה של התרכים השונים של  $I(m)$  כבהינת האקלים הוא כדלהלן:

20 עד 80	= לח
0 עד 20	= רטוב, לח למחצה
0 עד -20	= יבש, לח למחצה
20 עד -40	= צחיח למחצה
-40 עד -60	= צחיח
<-60	= צחיח ביותר

3. לפי שיטת קופן: BW=אקלים מדברי

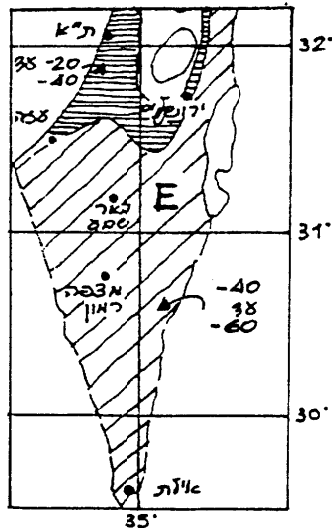
4. מקום השתנות מבטא את היחס בין כמות הגשם השנתית המקסימלית שידה לבין כמות הגשם המינימלית.

5. מקרם מדברי: desert varnish - קרום שחור המכסה אבנים וסלעים במדבר.

6. ריצוף מדברי: desert pavement - אבנים וחצץ המכסים שטחים מדבריים גדולים.

7. סיחוי: דפלאציה - הסעת חול ואבק ברוח. ליתר פירוט ראה (1), עמ' 27-40. להבנת השיבותם של המושגים הנ"ל ראה פרקי משנה 1.2 אזורים אקלימיים בנגב, 3.3 קריטריונים לבחירת אזורים ו- 3.6.4 חגנה טפני חול ואבק.

צויר 1-1  
לחות לפי Thornthwaite



## 1.2 אזורים אקלימיים בנגב

לפי ההגדרות שלעיל ניתן לקבוע בוודאות כי הנגב הוא מדבר, אך קשה לקבוע בדיוק את גבולותיו. ברור כי המעבר מאזור אקלימי אחד למשנהו אינו חד. נתוני האקלים, הלחות, המשקעים וכו' המופיעים במפות השונות (ראה ציורים 1-1 עד 1-6) מצביעים על אזור מעבר לאקלים מדברי ברצועה בעלת רוחב הנע בין 5 ל-20 ק"מ, המשתרעת מעזה במערב עד לבית-שאן בצפון-מזרח והעוברת צפונית לבאר-שבע, זרד חברון, בית-לחם וירושלים. שטחה של הרצועה הוא אזור מעבר:

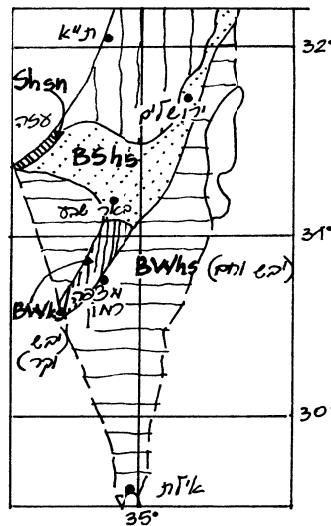
- ◆ מעבר אל אזור שבו מדד הלחות קטן מ-40 אשר מוגדר כצחיח (8);
- ◆ מעבר אל אזור שבו הטמפרטורה הממוצעת השנתית גבוהה מ-18 מעלות צלסיוס ובו האקלים ערבתי (9);
- ◆ מעבר מאזור שבו כמות הגשם הממוצעת השנתית גדולה מ-300 מ"מ אל אזור שבו כמות זו קטנה מ-200 מ"מ (10), (11).

למרות שטחו הקטן יחסית, אין אזור הנגב הומוגני מבחינה אקלימית. ניכרים הבדלים אקלימיים משמעותיים ביותר בין חלקיו השונים. הבדלים אקלימיים אלה נובעים מגורמים כמו הפיסיוגרפיה, המרחק מהים, הגובה מעל פני הים. גורמים אלה יוצרים הבדלי לחות וטמפרטורה (ככל שעולים מעל פני הים יורדת טמפרטורת האוויר הממוצעת במעלת צלסיוס אחת למאה מטר גובה) (12), (13). גורמים אלה יוצרים בנגב אזורים משנה בעלי נתונים אקלימיים אופייניים וייחודיים (14):

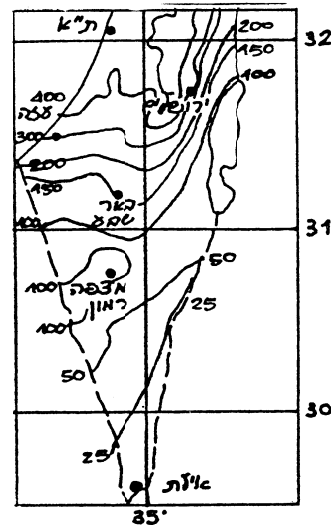
א. חוף הנגב - רצועה ליד הים ברוחב 2-8 ק"מ המשתרעת מאזור עזה לאורך החוף הצפוני של חצי האי סיני. האקלים באזור זה דומה לאקלים של אזור החוף מעזה עד ראש-הנקרה אך כמות הגשמים בו קטנה מזו של רצועת החוף הצפונית. הטמפרטורות הממוצעות בקיץ (ניר-יצחק, אוגוסט) נעות בין 30.6 מעלות צלסיוס ביום ל-20.9 בלילה, ובחורף (ינואר) בין 18.5 ביום ל-7.8 בלילה. באזור זה נכללים עזה ויישובי חבל עזה (חאן-יונס, דיר אל-בלח, רפיח), חבל קטיף ופתחת שלום (רעים, כיסופים, תלמי-יוסף, יבול, דקל, ניר-יצחק, כרם-שלום, אורים וכו').

ב. שפלת הנגב - אזור שפלת המדבר מאופיין באקלים מתון ונוח (מקדם אי-הנוחות המרבי הממוצע בקיץ הוא 26.8) (15). בקבוצה זו נכללים אזורים שונים מבחינת אפיונם הפיסיוגרפי (גובה מ-100 עד 500 מ' מעל פני הים, קרבה אל החוף וכו') ולכן ייתכנו הבדלי אקלים מקומיים מסוימים. לצורך תכנון מתחייבת אפוא בדיקה - במקום של הטופוגרפיה, הלחות היחסית ויתר המאפיינים האקלימיים. באופן כללי ביותר אפשר לומר כי הטמפרטורות הממוצעות (בבאר-שבע) בקיץ נעות בין 33.5 מעלות צלסיוס ביום ל-19 בלילה. בחורף הטמפרטורות הממוצעות נעות בין 17 מעלות ביום ל-6.8 בלילה. היישוב המרכזי באזור זה הוא באר-שבע, ועוד נכללים בו משאבי-שדה, רביבים, נתיבות, רהט, צאלים ונבטים. ניתן לכלול בו גם את היישובים הנמצאים בתוך אזור המעבר: שדרות, יופקים, מפלסים, ניר-עם.

ציור 1-2  
אקלים לפי Koppen



ציור 1-3  
גשמים (מ"מ/שנה)



8. לפי תורתוויט - ראה ציור 1-1.
  9. אזור BS(HS) לפי קופן - ראה ציור 1-2.
  10. ראה ציור 1-3.
  11. רצועה זו מוצעת כגבול בין המזרע לבין הישימוף, סופר א', תשל"ט, חלק א', עמ' 4.
  12. המועצה הלאומית למחקר ופיתוח, דצמבר 1973, חלק I.
  13. זרד ע', תשל"ו, עמ' 46.
  14. חלוקה זו על פי זרד ע', שם, עמ' 43.
  15.  $DI = (WB + DB) / 2$   
 DI - מקדם אי-נוחות  
 WB - טמפרטורת גולה לחה  
 DB - טמפרטורת גולה יבשה
- על פי Sohar E., 1979, pp.485. ליתר פירוט ראה פרק 1.3 הנודדת הנוחות התרמית לפי האזורים ולפי עונות השנה.

ג. הר הנגב - זהו האזור שבין הבקעה לשפלה, והוא נמצא ברובו מעל קו-הגובה 500 מ'. הקיץ נוח ויבש והחורף קר למדי (במצפה-רמון הטמפרטורה הממוצעת בקיץ נעה בין 32.6 מעלות ביום ל-18.4 בלילה, ובחורף בין 14 מעלות ביום ל-6 בלילה). היישובים העיקריים באזור הם אשתמוע, דימונה, ירוחם, שדה-בוקר, מצפה-רמון וערד.

ד. הערבה - אזור זה הוא חלק מחבל ארז וצר יחסית הכולל את אזור הערבה, בקעת הירדן ועמק בית-שאן. הבקע נמצא בשבר הסורי-אפריקני וחלקו הגדול נמצא מתחת לפני הים. באילת הטמפרטורות הממוצעות בחודש אוגוסט (החודש החם) נעות בין 38.5 מעלות מקסימום ל-24 מינימום (הטמפרטורה הממוצעת היומית היא 31.3 מעלות). באוגוסט מקדם אי-הנוחות בשעה 14:00 הוא 31.5; כלומר - עומס החום גבוה. החום שולט ברוב חודשי השנה האחרים כמעט במשך כל שעות היממה. טמפרטורות החורף הממוצעות נעות בין 20.1 מעלות ביום ל-9.8 בלילה. אזור זה כולל את היישובים אילת, אילות, אליפז, סמר, יטבתה, גרופית, קטורה, מרכז ספיר, באר-מנוחה, עין-יהב, תצבה, עין-חצבה, עיר-אובות, נאות-הכיכר, נוה-זאה, עין-גדי, סדום, עין-בוקק, יריחו.

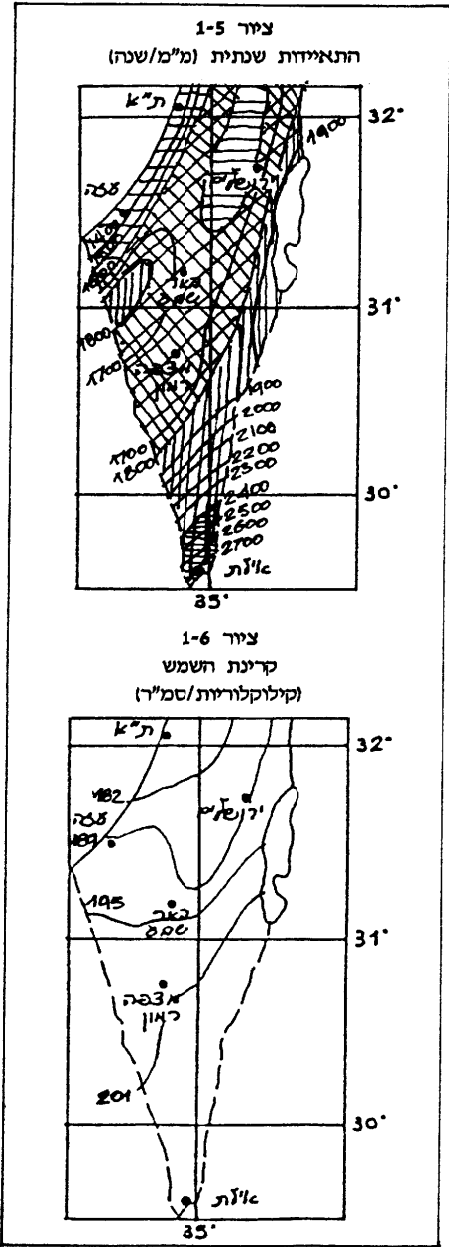
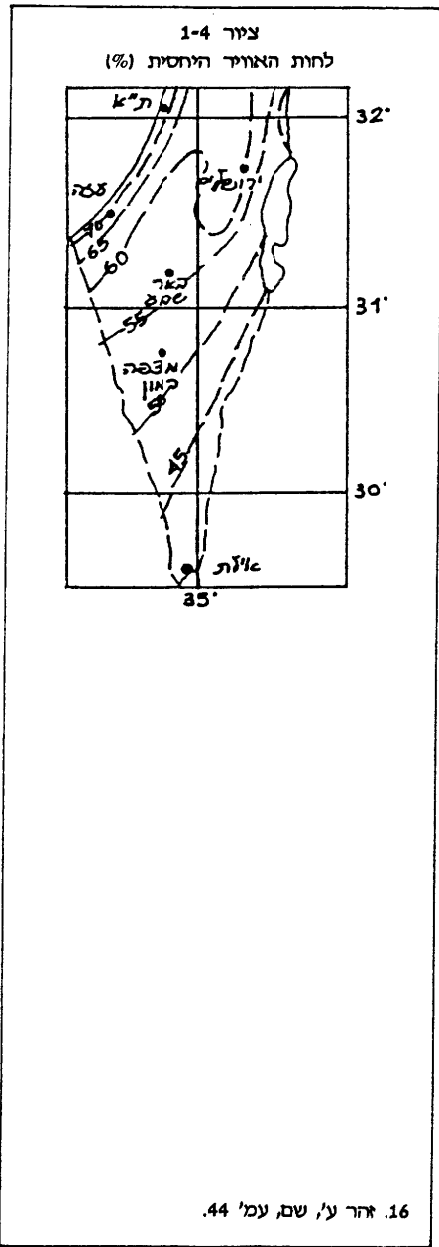
אזורי המדבר בארץ, להוציא את אזורים א' וד', אינם אזורים חמים. אדרבה, ניתן לראות שעומס החום באזורים אחרים (מסביב לכנרת למשל ואנילו בשפלת החוף, שבה מרוכות רוב האוכלוסיה) הוא גבוה יותר מאשר עומס החום השורר במרבית אזורי המדבר. יש להינתק אפוא מאמונת השווא הרוואה הקבלה וזחות בין המדבר לבין אקלים חם (16).

**רוח, אבק, חול, בוחק, סנוור**

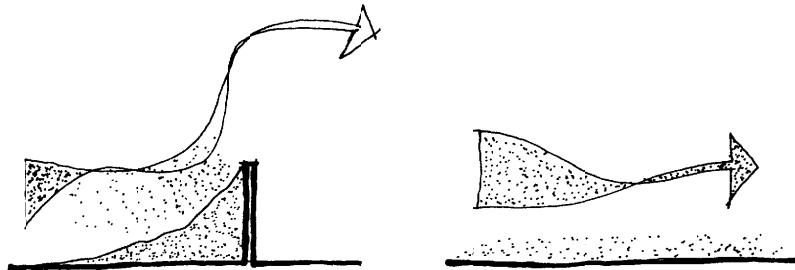
בעיות משותפות לכל האזורים המדבריים הן הרוחות, הנושאות עמן אבק וחול, הבוחק והסנוור. הגורם העיקרי והמשותף לתדירות שתי התופעות הוא העדר כיסוי צמחייה לקרקע ומיעוט שטחים בנויים.

**רוח, אבק וחול:** הקרקע החשופה מתחממת מהר מקרינת השמש ובשל כך מתחממים במהירות גושים גדולים של אוויר ועולים מעלה. אוויר מאזורים קרים יותר נע במהירות מתחתם כדי למלא את מקומו של האוויר המחומם. תנועה הפוכה מתרחשת בשעות הלילה, כאשר הקרקע במדבר מתקררת מהר בשל קרינת חום אל השמים. העדר מכשולים על פני שטחים גדולים מאפשר תנועת אוויר מהירה. ככל שמהירות תנועת האוויר גדלה, גדלה גם יכולתו לשאת חלקיקי אבק וחול. החלקיקים נישאים על ידי הרוח עד שמהירותה קטנה או עד שהם נתקלים במכשול.

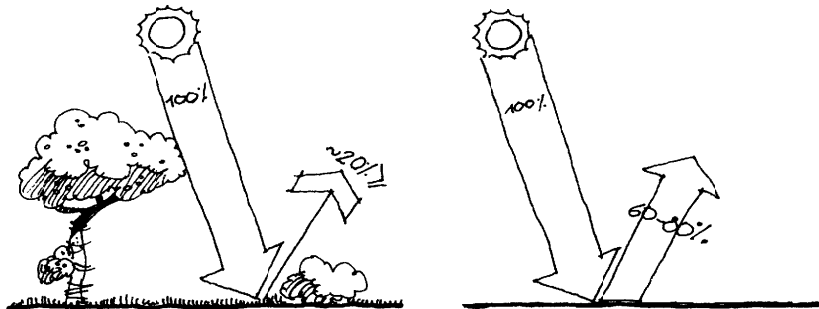
**בוחק וסנוור:** העדר כיסוי קרקע צמחי וגונון הבהיר של קרקעות רבות במדבר גורם לקרינה מוחזרת בשיעורים גבוהים מאלה שבהם מוחזרת קרינה באזורים אחרים. הבוחק הנוצר מסנוור ומהווה מטרד לנמצאים בשטח פתוח.



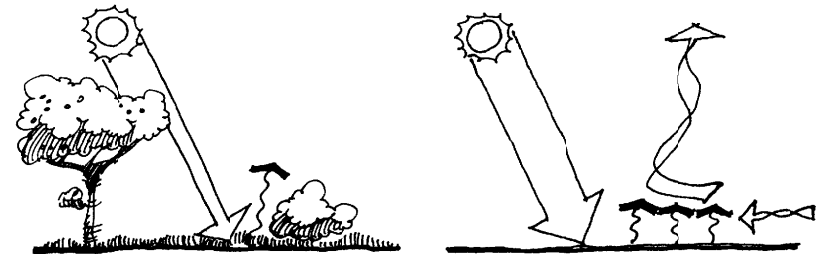
ציור 1-9  
 קרקע חשופה מאפשרת הסעת חלקיקים על ידי הרוח. מכשולים גורמים  
 האטת הרוח ונשירת החלקיקים הגינשאים



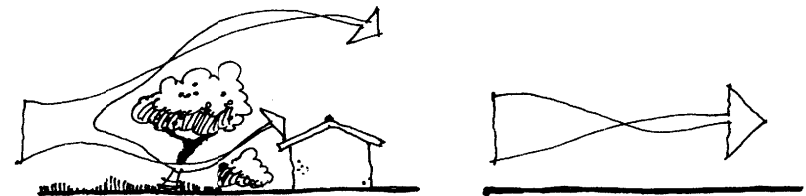
ציור 1-10  
 קרקע חשופה מחזירה קרינה בשיעור גבוה מאשר קרקע מכוסה צמחייה



ציור 1-7  
 קרקע חשופה מתחממת מהר יחסית לקרקע מכוסה צמחייה



ציור 1-8  
 קרקע חשופה ומישורית מאפשרת הגברת מהירות הרוח. מכשולים טבעיים  
 (צמחייה, תלליים) ומלאכותיים (בניינים, סוללות, גדרות) מאיטים  
 את הרוח ומשנים את כיוונה





### 1.3 הגדרת הנוחות התרמית לפי אזורים ולפי עונות השנה

#### 1.3.1 קביעת תנאי נוחות

שימוש במפה הביו-אקלימית מאפשר השוואה של התנאים האקלימיים באזור או במבנה ביחס לתחום תנאי הנוחות המבוקשים ומצביע על דרכים ואפשרויות לשיפור תנאי אי-הנוחות והבאתם לתחום הנוחות.

ניתן להגדיר נוחות תרמית כמצב שבו טמפרטורת גוף האדם היא 36.5-37.5 מעלות צלסיוס, הטמפרטורה הממוצעת של העור 33-35 מעלות, העור חונשי מזיעה והשרירים אינם מצטמרדים. חריגה מתחום הטמפרטורות הנ"ל, הזעת יתר או צמרמורת, כולן ביחוד או כל אחת לחוד, גורמות תחושת חוסר נוחות הגדלה ככל שהחריגה גדולה יותר. כאשר מנגנוני הגוף אינם מסוגלים לשמור על טמפרטורת הגוף בתחום הנוחות, העלייה (מעל ל-43 מעלות) או הירידה (מתחת ל-32 מעלות) בחום הגוף גורמות להפרעות תפקודיות שונות, לאבדן חושים ואפילו למות.

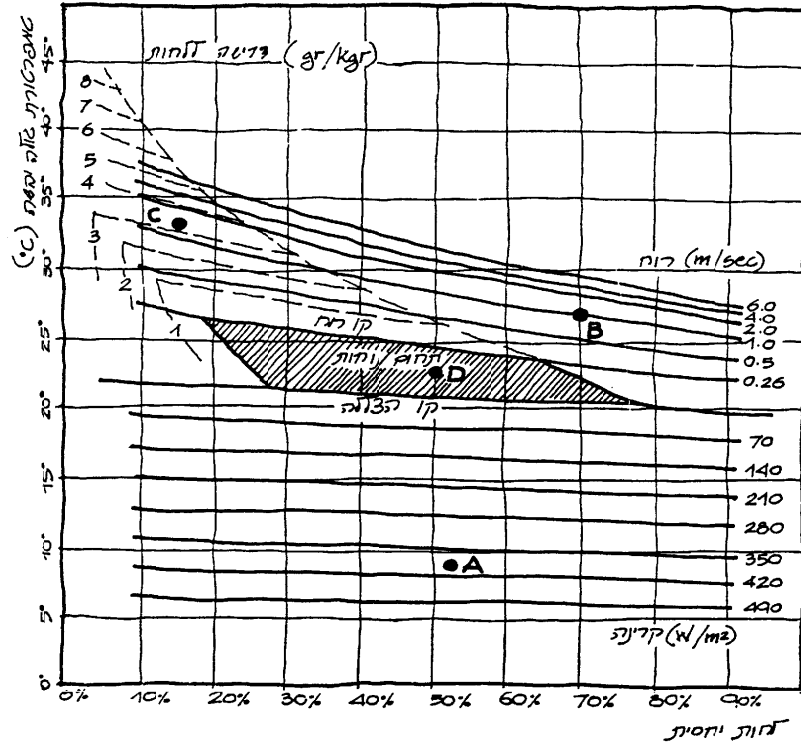
חום גוף האדם תלוי במספר גורמים פנימיים וחיצוניים. בתהליכי חילופי חומרים (מטאבוליזם) (M) יוצר הגוף חום פנימי אשר בחלקו הופך לאנרגיה מכנית (W), וחלקו האחר נפלט בתהליך אידיוי הזיעה (E). במקביל לכך, גוף האדם קולט חום מסביבתו בצורת קרינה (R) והסעה (C). שיווי משקל אנרגטי קיים, כאשר שינוי כמות החום בגוף (ΔS) שווה ל-0 (17), (18).

המפה הביו-אקלימית היא תרשים המתאר את ארבעת המשתנים האקלימיים הקובעים נוחות תרמית: טמפרטורת האוויר, לחות האוויר, מהירות תנועת האוויר והקרינה. תנאי הנוחות מושפעים עוד משני גורמים: רמת הפעילות וסוג הביגוד. המפה הביו-אקלימית המובאת כאן (ראה ציורים 1-12 ו-1-15) מתייחסת לרמת ביגוד  $Cl_0 = 0.8$  (ביגוד חרפי טיפוס) ורמת פעילות השווה ל-1.3 met, המתאימה להליכה איטית או לעבודה משרדית. תנאים מחוץ לתחום הנוחות דורשים להפעיל אמצעים שיביאו את אותם תנאים אל תוך תחום הנוחות. לדוגמה: מיקומה של נקודה A מוגדר על ידי טמפרטורה של 9 מעלות צלסיוס ולחות יחסית 52%. מצב זה מוגדר בדרך כלל כמצב קר למדי. מכיוון שנקודה A נמצאת מתחת לקו הרוח, ניתן להניח כי יש הגנה מפניה. אלמלא כן, הרגשת אי-הנוחות היתה גדולה יותר בגלל הרגשת הצינון שגורמת הרוח.

הקווים הישירים מתחת לקו ההצללה מבטאים כמות קרינה הנקלטת על ידי משטח אופקי, ואשר עשויה לפצות על טמפרטורת האוויר הנמוכה. אילו בתנאי נקודה A היתה נקלטת קרינה השווה ל-400 ואט/מ"ר בקירוב, אדם הנמצא בתנאים אלה היה חם בנות.

בנקודה B שבה הטמפרטורה 27 מעלות והלחות היחסית 70%, אדם היה חם בנות, אילו שהה בכל ואילו נשבה רוח במהירות של 1 מ'/שנייה.

ציור 1-12  
מפה ביו-אקלימית



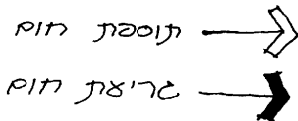
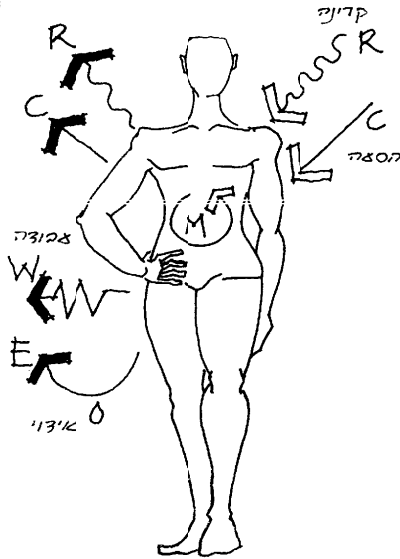
17. שפידיא לי, 1985, עמ' 1-2.

$$\Delta S = M (W+E) \pm R \pm C \quad 18$$

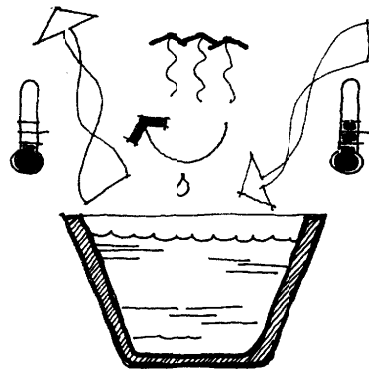
ליתר פירוט בנושא תנאי הנוחות ראה:

שם, עמ' 1 ג' - 1 ג' 17.

ציור 1-13  
מאון אנרגיה בטף האדם



ציור 1-14  
האוויר מאבד אנרגיה כאשר הוא  
בא במגע עם מים



Brown G.Z., 1985, pp.33-35 .19

$$DI = (WB + DB) / 2 \quad .20$$

DI - מקדם אי-נוחות  
WB - טמפרטורת גולה לחה  
DB - טמפרטורת גולה יבשה

מקדם אי-נוחות discomfort index	עומס חום heat load
-----------------------------------	-----------------------

<22	אין
22 < 24	קל
24 < 28	ביעני
28 <	כבד

ראה גם סעיף 1.3.1 קביעת תנאי נוחות.

Givoni B., 1981 .21

.22 הופמן מ"א, 1976, עמ' 43-45.

.23 שפירא י', 1985. הטסחאות והטבלאות מופיעות בפרק הון בנוחות חרמית.

בנקודה C, שבה הטמפרטורה היא 32 מעלות והלחות היחסית 15%, ניתן לשפר את תנאי הנוחות על ידי אידוי מים ובכך להוריד את טמפרטורת האוויר. הקווים המקווקים מציינים את כמות המים הדרושה לקילוגרם של אוויר יבש.

נקודה D נמצאת בתחום תנאי הנוחות. בנקודה זו הטמפרטורה היא 24 מעלות, הלחות היחסית 50% ויש צורך בהצללה אך לא ברוח. פירוש הדבר כי אדם הנמצא בתנאים אלו ירגיש נוח, כאשר הוא בצל.

מיפוי תנאי האקלים של אזור, אתר או מבנה לאורך תקופה יאפשר קביעה ודאית של דרכי שיפור התנאים המקומיים. ככל שתקופת הבדיקות והמיפוי על גבי המפה הביו-אקלימית ארוכה יותר, כך יהיו התוצאות אמינות יותר (ממוצע רב-שנתי משקף את המציאות יותר מאשר ממוצע חד-שנתי העלול להיות מושפע מתנודות לא אופייניות) (19).

**המלצה: לצורך הבנת התנאים האקלימיים של אזור או אתר והשלכותיהם התכנוניות יש למפות תנאים אלו על גבי המפה הביו-אקלימית ולהשוותם עם התחום המוגדר כתחום הנוחות. חריגה מתחום זה דורשת 'תיקון' כמצוין במפה (תוספת צל, קרינה, רוח או לחות).**

### 1.3.2 שיטות להערכת תנאי הנוחות

קיימים מדדים שונים להערכת תנאי הנוחות. שיטה פשוטה היא שיטת מקדם אי-נוחות, המבטא את עומס החום והכאפשר להגדיר בצורה מהירה ובעזרת מעט נתונים את תנאי הנוחות (20).

מדדים מדויקים יותר מתחשבים במשתנים נוספים מלבד טמפרטורות גולה לחה ויבשה; מהירות רוח, סוג ביגוד ועוד (21), (22), (23).

שיטה גראפית כוללת להערכת תנאי הנוחות פותחה בידי אולגיאי (Olgay). תחום תנאי הנוחות מסומן על גבי תרשים המשלב את טמפרטורת האוויר, הלחות, הקרינה ומהירות הרוח. על תרשים זה ניתן למפות את תנאי האקלים המקומיים בכל זמן. כאשר אלה נמצאים מטה מתחום תנאי הנוחות, דרושה תוספת חום להשגת נוחות תרמית; כשהתנאים ממופים למעלה מתחום הנוחות יש צורך בתנועת אוויר והצללה.

### 1.3.3 תנאי נוחות תרמית

ניסויים שונים הצביעו על תחום מצומצם יחסית של תנאים סביבתיים (להבדיל מטמפרטורות גוף האדם) שבהם חש האדם בנוח. תחום זה נמצא בין 20 - 27 מעלות (ניתן להגיע לסביבות 30 מעלות בתנאים מסוימים) ובתנאי לחות יחסית בין 20% - 80%. ככל שהטמפרטורה גבוהה יותר רצויה לחות יחסית נמוכה יותר משום שאז מתאפשר קירור הגוף באידוי (הזעה). כאשר הטמפרטורה או הלחות גבוהות מהמומלץ

**בתחום הנוחות, רצויה תנועת אוויר במהירות שונה שלא תעלה על מטר לשנייה אשר גם היא מגבירה את קצב אידוי הזיעה מהגוף. מתחת לתחום הטמפרטורות הרצוי יש בדרך כלל דרישה לתוספת בידוד (ביגוד) או חימום החלל באמצעים שונים.**

**תחום הנוחות נקבע בעזרת מדידות ניסיויות והוא מהווה ממוצע של תגובות הנבדקים. יש להדגיש כי בכל מקרה תהיינה סטיות של העדפות אישיות ביחס לתנאים הסביבתיים בשל הבדלים פיסיולוגיים ואורגניים (מטאבוליזם שונה, הבדלים בין גברים לנשים, בין צעירים למבוגרים, בין בריאים לחולים, הבדלי מוצא אתני ורקע חברתי-כלכלי). תנאי הנוחות המובאים פה נחשבים כמקובלים על רוב הנבדקים, ובכל מקרה אחוז הלא-מרוצים מהתנאים הסביבתיים לא יעלה על 10% מהמדגם.**

במדבר חלקיקי אבק וחול המרחפים באוויר עלולים להשפיע גם הם על הרגשת אי-הנוחות, ויש להתחשב בגורמים אלה בנוסף לגורמים התרמיים וללחות.

### 1.3.4 אקלום

אדם בריא מסוגל להתמודד עם תנאים סביבתיים משתנים (מעבר מאזור אקלימי אחד למשנהו או שינויים פתאומיים בתנאי האקלים במקום מסוים). תהליך התאמת המנגנונים השונים של גוף האדם לתנאי אקלים חדשים נקרא **אקלום**. תהליך אקלום שלם נמשך כשלושה שבועות, אך התאמה חלקית (כ- 50%) לתנאים חדשים מושגת תוך 4-5 ימים. לצורך השגת דרגה זו של אקלום, מספיק להיחשף לתנאים החדשים במשך 4-4 שעות ביממה.

מקרה מיוחד של שינוי פתאומי וקיצוני בתנאים הסביבתיים מהווה השרב (חמסין) האביבי. במקרה זה הטמפרטורה עולה ב-10 מעלות צלסיוס בקירוב יחסית לממוצע של הימים הקודמים, בעוד שמנגנוני הגוף מותאמים עדיין לתנאי מזג האוויר הלא שרבי. במקרה זה ייתכן צורך בשימוש באמצעים מכניים להשגת תנאי נוחות (24).

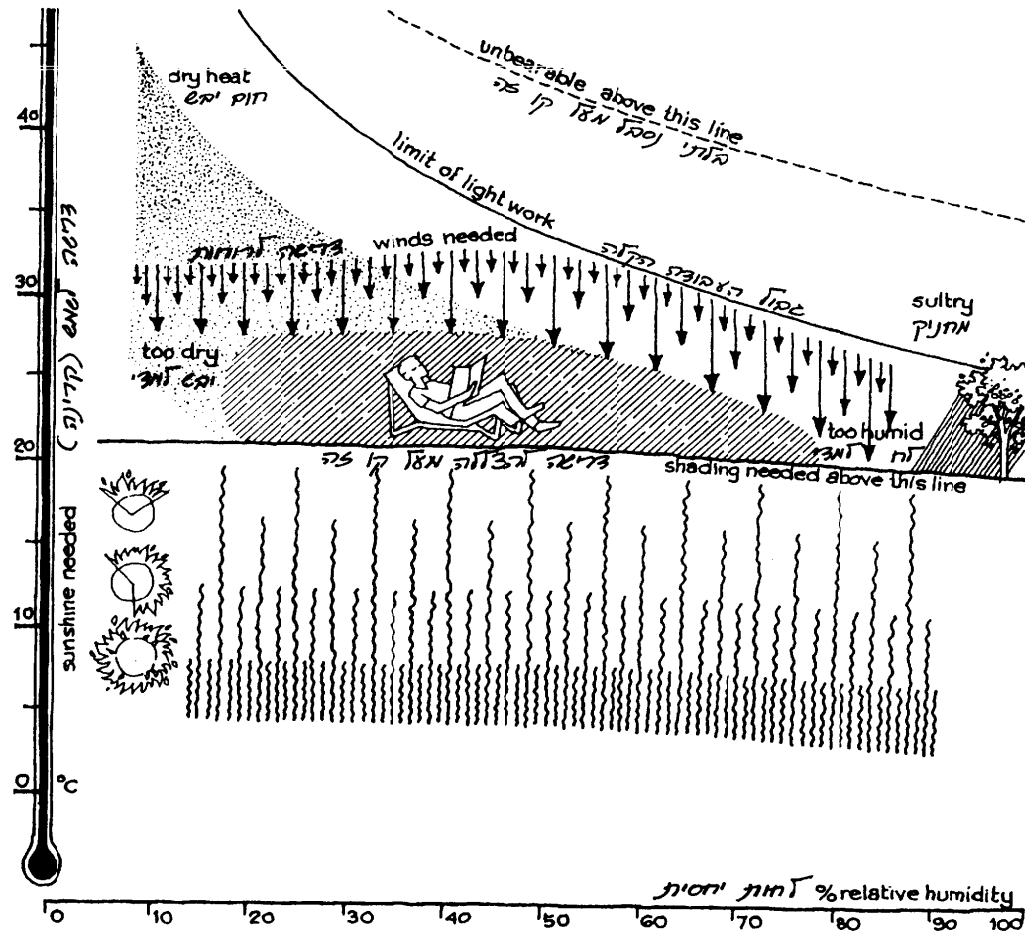
**טבלה 2-1: תנאי נוחות תרמית לפי אזורים אקלימיים בנגב**

סוג האקלים	הטמפרטורה בינואר			הטמפרטורה באוגוסט			האזור המיוצג
	הערות	MIN יומי DEG.C	MAX יומי DEG.C	הערות	לחות יחסית בשעה 14:00 %	MIN יומי DEG.C	
ממוא	דרוש חימום	7.8	18.5	דרוש קיור	70	20.9	30.6
מתון	דרוש חימום	6.8	17.0	דרוש קיור ביום	26	19.0	33.5
קריר	דרוש חימום	6.0	14.0	דרוש קיור ביום	28	18.4	32.6
חם	דרוש חימום בלילה	9.8	20.1	דרוש קיור לפחות ביום	30	24.0	38.5

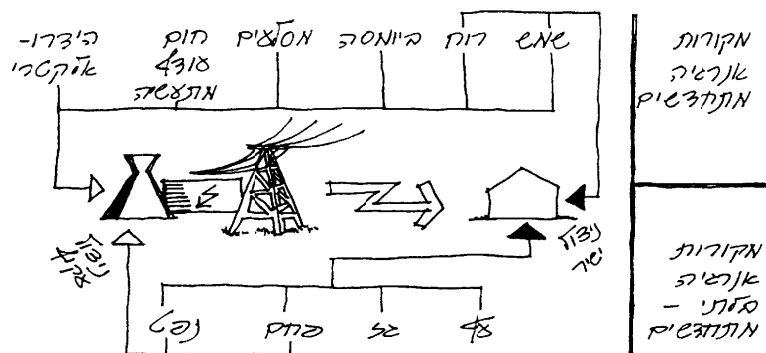
טבלה זו מתייחסת למצב של מצוה או עבודה נשיבה. כאשר רמת הפעילות עולה (עבודה פיזית אינטנסיבית או קשה) מורידה הדרישה לקיור בחודשי הקיץ ובמקביל יורדת הדרישה לחימום בחודשי החורף (לפחות בשעות היום). בעונת המעבר קטנות הדרישות לבקרת אקלים מלאכותית פרט למקרי השרב ובמיוחד בעונת האביב.



צויר 1-15  
 מפה ביו-אקלימית לפי Olgyay



ציור 1-16  
מקורות אנרגיה



טבלה 3-1: ניצול מקורות אנרגיה מתחדשים

אופן הניצול ואמצעים	ישיר	עקיף
מקור		
שמש	חימום: קולטים מסויגים	הפקת חשמל: קולטים מסויגים שונים תאים פוטו-וולטאיים בריכות סולאריות
רוח	קירור: אוויר אידי	הפקת חשמל טורבינת רוח
ביומס	חימום: שרפה ייצור ?	הפקת חשמל שרפה
מסלעים		הפקת חשמל
תעשייה - חום עידף	חימום: מחליפי חום	הפקת חשמל

Merril R. & Gage T., 1978 .25

.26 באשר לשיטות ולמקורות האחרים ניתן לעיין בספרות המוזכרת בסוף המודיק.

## 1.4 שיטות להשגת נוחות תרמית - חימום וקירור (מקורות אנרגיה בלתי מתחדשים ומתחדשים)

פרק זה נותן הסבר כללי קצר על טכניקות חימום וקירור מבנים בתנאים מדבריים. לפרטים טכניים יותר מופנה הקורא אל המקורות. ניתן לחלק את מקורות האנרגיה לשתי קבוצות כלליות - בלתי-מתחדשים ומתחדשים. ניצולם של שני סוגי המקורות לצורך השגת תנאי נוחות יכול להיעשות באופן ישיר או עקיף.

### 1.4.1 מקורות אנרגיה בלתי-מתחדשים

החשובים במקורות אלו בישראל הם הנפט ומצרי, הפחם, הגז והנץ. ניצולם הישיר מושג על ידי שרפתם לייצור חום. בצורה עקיפה ניתן לנצל מקורות אנרגיה אלה לצורך הפקת חשמל שבעזרתו ניתן להפעיל מערכות חימום או קירור שונות. מערכות אלו שונות במידת יעילותן (תנורי חשמל לחימום יעילים פחות ממשאבות חום, למשל), אך כולן משתמשות במקורות אנרגיה שניתן להגדירם כבלתי-מתחדשים (קצב צריכתם גדול בהרבה מקצב התחדשותם). כיום מספקים מקורות אלה יותר מ-80% מהאנרגיה הנצרכת בעולם (25).

### 1.4.2 מקורות אנרגיה מתחדשים (חליפיים)

בקבוצה זו נכלל מגוון רחב של מקורות: שמש, רוח, מים, חום מסלעים, ביומסה, חום עידף מתעשייה. כמו בקבוצה הקודמת, גם כאן ניתן לנצל מקורות אלו בצורה ישירה (קליטת קרינה; שרפת ביומסה לחימום; ניצול רוחות לאוויר וקירור; ניצול קרינת שמש בתהליכים הליוכימיים - חומרים משנים נאזה) או בצורה עקיפה (ניצול קרינת שמש בתהליכים הליואלקטריים - תאים פוטוולטאיים; קולטים מסויגים שונים; בריכות סולאריות; טורבינת רוח; שרפת ביומסה; ניצול חום עידף מתעשייה וחום מסלעים להפקת חשמל). למקורות האנרגיה המתחדשים ניתן לצרף גם את המקורות ההידרו-אלקטריים (ניצול דימת המים להפקת חשמל), אך מקורות אלה אינם רלוונטיים לארצנו וחשיבותם ויעילותם משנית.

אם כי חשיבותן של דרכי הניצול העקיף של מקורות אנרגיה מתחדשים (חליפיים) מרובה, פרק זה יעסוק רק באופן הניצול הישיר של אותם המקורות, שכן אלה משפיעים ישירות על צורות המבנה והארגון המרחבי של היישוב (שמש ורוח) (26).

שמש: קרינת השמש על פני כדור הארץ מורכבת מקרינה ישירה, מוחזרת ומפוזרת, והיא בעלת אורכי גל בתחום הגלים הנקראים קצרים (אור נראה לעין שהוא בעל אורך גל של 0.00004-0.00007 ס"מ.) עם הפגיעה בחומר חלק מהקרינה מוחזר מיד מפני החומר, וחלקה האחר נספג בו ומעלה את חומו. הגוף החם מקרין אז גלים ארוכים (בתחום האינפרא-אדום) אל סביבתו, וכך מפסיד חלק מהחום האגור בו. רוא עשוי להפסיד חום גם באמצעות הולכה והסעה. אופיו המדויק של תהליך הזה

תלוי בתכונות החומר (משקל סגולי, מוליכות חום, צבע פנים וספיגת חום) שלהם כמו גם בסביבה שבה נמצא החומר (הפרשי טמפרטורה).

כאשר יש חומר שקוף כלשהו (זכוכית, פוליקרבונט וכו') בין המסה המחוממת לבין מקור הקרינה, נוצר תהליך חד-כיווני: החומר השקוף מעביר בדרך כלל קרינה קצרת גל וחוסם קרינה ארוכת גל: הקרינה קצרת הגל (אור) הופכת לארוכת גל (חום); היא נלכדת בחלל שמאחורי החומר השקוף. במקרה זה איבוד חום לסביבה נעשה בהולכה (דרך החומר השקוף) ובהסעה. תופעה זו של לכידת חום מאחורי חומר שקוף נקראת **תופעת החממה (greenhouse effect)** (27).

תכונות אלו של הקרינה ושל החומרים השונים ניתן לנצל בשני סוגי מערכות לחימום וקירור מבנים: אקטיביות ופסיביות.

**א. חימום**

\* **מערכת אקטיבית (active system)** משתמשת במשטחי קליטה, מערכות אחסון, מערכת העברת האנרגיה וחלוקתה. במערכת אקטיבית מצויים תמיד נוזלים עובדים (working fluids) אחד או יותר, אשר קולטים, מעבירים, מאחסנים ומחלקים את האנרגיה. במערכת אקטיבית נוזלים אלו (נוזלים או גזים) נעים תמיד בעזרת משאבה או מפוח.

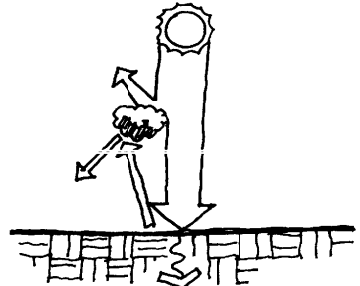
\* **במערכת פסיבית (passive system)** לחימום מבנים הבניין כולו מתוכנן כמערכת קליטה ואגירה אינטגרלית של אנרגיית השמש המנוצלת. יעילות המערכת תלויה בהפניית הבניין, בהפניה ובגודל של הפתחים, בתכונות התרמויות של חומר הבניין ובתכנון הפנימי של המבנה.

\* קיימות גם **מערכות משולבות (hybrid systems)** שבתן משולבים שני סוגי השיטות. בדרך כלל מערכות אלו כוללות מערכת מכנית נפרדת לאחסון האנרגיה ו/או מערכת מכנית לחלוקתה. הקו המפריד בין מערכות פסיביות לבין מערכות משולבות דק מאוד ולעתים חשיבותו תיאורטית בלבד (28).

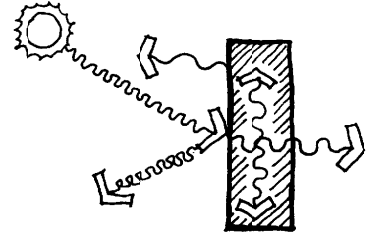
מניסיון שהצטבר בפרוייקטים בנגב מתברר ששם המערכות הפסיביות עדיפות על האקטיביות בגלל העלות ההתחלתית הנמוכה שלהן בהקמה והוצאות התפעול הקטנות במחזור החיים שלהן. מערכות אלה נחלקות לשתי קבוצות משנה:

\* **קליטה עקיפה (indirect gain)**: מרכיבי מבנה היצויים מסיביים (קירות, גג) קולטים את קרינת השמש ואוגרים אותה. פתרון זה אינו מתאים לבניינים 'קלים'. עיקרון זה יושם בפתרונות כמו קיר אוגר (Trombe-Michel wall) קיר מים, בריכת גג (29). פתרונות המשתמשים במים או בנוזלים אחרים כמסת אגירה דורשים תכנון נכון המאפשר תחזוקה שוטפת. בכל הפתרונות הללו יש למנוע התחממות יתר בעונת הקיץ (בידוד, הצללה, נטרול המערכת) (30).

ציור 1-17 קרינה ישירה, מפוארת ומוחזרת



ציור 1-18 החזרה, קליטה ופליטה של קרינה הפוגעת בגוף



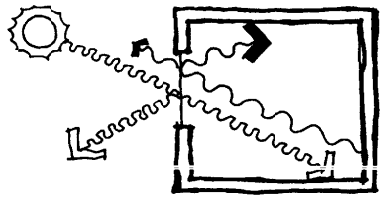
27. ליתר פירוט ראה סעיפים 1.5  
בידוד תרמי, 1.6 מסת הבניין, 1.10  
פתחים.

28. Lebens R.M., 1980, p.27

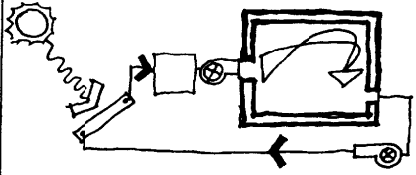
29. ראה גם סעיפים 1.13 נתונים  
אקלימיים לחישוב עומס חימום וקירור,  
2.2 חגג, 2.3 קירות.

30. Lebens R.M., op. cit.

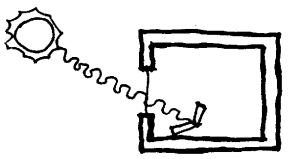
ציור 1-19 תופעת החממה



ציור 1-20 מערכת אקטיבית



ציור 1-21 מערכת פסיבית



\* קליטה ישירה (direct gain): חזית שקופה מאפשרת חדירה של קרינת השמש אל תוך המבנה. הקרינה נאגרת במסות פנימיות (קירות, מחיצות, רצפה וכו'). הקרינה יכולה להיקלט במסה שבה היא פוגעת ראשונה (non-diffusing direct gain) או במסות אחרות שאליהן היא מוחזרת ממשטח הפגיעה הראשון (diffusing direct gain) (31). בקבוצה זו של פתרונות כלולים חממה צמודה, מרפסת שמש ועוד (32).

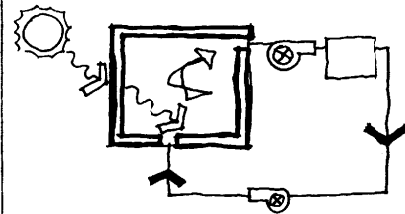
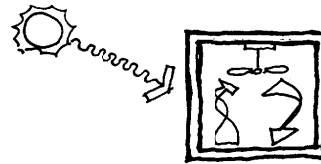
ב. קירור

\* קרינה ארוכת-גל אל הסביבה (longwave outgoing radiation): טמפרטורת הסביבה הנמוכה בשעות הלילה גורמת לקרינת חום מהמבנה אל סביבתו. שיעור הקרינה הוא יחסי להפרש בין החזקות הרביעיות של טמפרטורת הגוף המקרין לבין טמפרטורת הגוף הסופג את הקרינה. בהיות הדקיע הגוף הגדול ביותר הקיים בכל סביבה חיצונית ובעל הטמפרטורה הנמוכה ביותר, טבעי שהרקיע מהווה 'גוף סופג' (heat sink) טבעי (33). טמפרטורת הרקיע הנמוכה ביותר נמדדת באזית, וככל שיורדים אל האופק עולה הטמפרטורה. תופעת איבוד החום לרקיע גוברת, ככל שלחץ האדים באוויר נמוך והשמים נקיים מעננים (34).

קרינת החום אל הסביבה מתרחשת אמנם דרך כל מעטפת הגוף, אך במקרה של מבנים, ובמיוחד בתוך רקמה עירונית, הימצאותם של עצמים (צמחייה, מבנים וכו') בסמוך למבנה מקטינה את יעילות הקרינה דרך הקירות. גם העובדה שהקירות אינם 'רואים' את הרקיע אלא בזווית שטוחה מאוד וקרובה לאופק מקטינה את פוטנציאל איבוד החום דרכם. מרכיב מעטפת המבנה העיקרי לצורך קירור המבנה הוא אפוא הגג. מקרן הגג הפונה אל השמים חייב להיות מוליך חום טוב, והוא יכול להיות עשוי מחומר קל ומוליך חום (קרום מתכת, אלומיניום וכו') או מחומר מסיבי (בטון); כל אחד מהם מתאים לטכניקת קירור ואגירה שונה. בכל מקרה יהיה הגג מבודד היטב במשך שעות היום וחשוף רק בשעות הלילה, כדי למנוע התחממות במשך היום. כמו כן יהיה צורך לבדוד איתו בעונת החורף, כדי למנוע בריחת חום דרכו (35).

\* קירור באידוי (evaporating cooling): ניתן לקרר מבנים על ידי אידוי מים. אידוי מים הוא תהליך הצורך חום, וחום זה נלקח מהסביבה. בריכה שממנה מתאדים מים או אוויר שבתוכו אידוי מים יפסידו מחומם. ניתן לנצל תהליך זה באחד משני אופנים: 1) באידוי טבעי של מים מבריכה הנמצאת על גג הבניין, קירור הגג ודרכו קירור הבניין. גם במקרה זה יש לדאוג לבידוד הגג בחורף (מניעת איבוד חום) ובמשך היום (שיעור החימום בעקבות קרינת השמש יהיה גבוה משיעור החום באידוי, והמאזן של המערכת שלילי). 2) קירור האוויר החודר לבניין על ידי אידוי מים בתוכו. ארו העיקרון שלפיו פועלים מצנן מדברי (desert cooler) וארובת אורור (36).

ציור 1-22 מערכת משולבת



31. שם.

32. ראה גם סעיפים 2.4 רצמות, 2.5 מתחים.

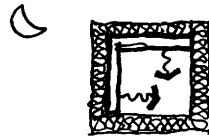
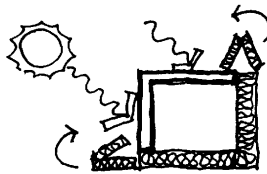
33. דבוסקין ד' וגרנח ל', 1985, עמ' ה - 19.

34. Givoni B., 1981, p.404

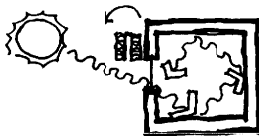
35. ראה סעיפים: 1.5 ביזוד תומ, 1.6 מסת הבניין, 1.13 נתונים אקלימיים לחישוב עומס חימום וקירור, 2.2 הגג.

36. פתרון מסוג זה ניתן לראות ב'בית האדובה' במסגרת לחקר המדבר, מודשת שדה-בקר. פתרונות דומים מקובלים בארכיטקטורה המסורתית של איראן ופקיסטאן.

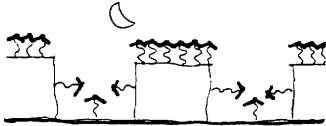
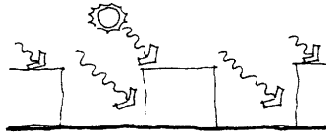
ציור 1-23 קליטה עקיפה



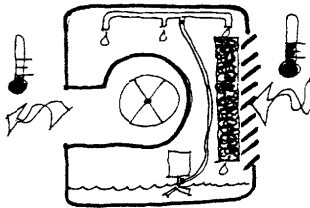
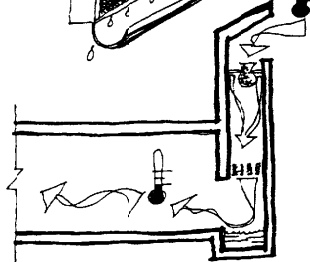
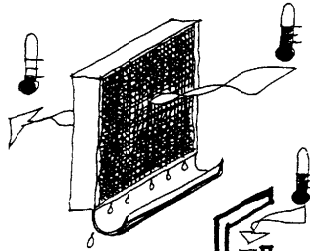
ציור 1-24 קליטה ישירה



ציור 1-25  
קירור בקרינה לילית



ציור 1-26  
קירור באידוי



37. ראה גם סעיף 1.2 הגדרת תנאי הנוחות למי אזורים ולמי עונות השנה.

38. ראה סעיף 1.12 חזירת אוויר.

39. ראה הערה (8) עמ' 1-1.

• אורור: לאורור שלושה תפקידים עיקריים:

- ◆ הכנסת אוויר טרי לבניין (החלפת זו-תחמוצת הפחמן בחמצן, והוצאת ריחות).
- ◆ הגברת תנועת האוויר להגברת אידוי היערה מגוף אנשים שבתוכו והקניית הרגשה של קרירות (37);
- ◆ קירור המבנה. קירור מבנה באמצעות אורור יושג כאשר האור שיעבור דרכו יהיה בטמפרטורה נמוכה מטמפרטורת המבנה. שיטה זו יעילה במיוחד באזורי מדבר אשר בהם הפרשים גדולים בין טמפרטורות היום והלילה, ואשר בהם טמפרטורת האוויר הלילי נמוכה.

התפקיד הראשון יידון בהרחבה בהמשך פרק זה (38). לכל אחד מתפקידי האורור דרישות שונות מבחינת הפתחים (גודל, מיקום), ויש להתייחס לנושא בתהליך קביעת המטרות והתכנון (39).

## 1.5 בידוד תרמי

הגורם החשוב ביותר במעטפת הבניין, בכל הקשור לזרימת אנרגיה מבפנים החוצה ולהפך, הוא שיעור הבידוד התרמי. בידוד תרמי מקטין את הזרימה פנימה של חום בלתי רצוי במשך הקיץ, ומצמצם את איבוד החום במשך החורף.

המידה המקובלת של הבידוד היא המוליכות התרמית או 'ערך ה-U' של רכיב בדופן הבניין (קיר, חלון וכו'). 'ערך ה-U' מבטא את זרימת החום ליחידת שטח בחלק הנמדד לכל מעלה בהפרש הטמפרטורה בין שני צדדיו:

$$[1.5-A] \quad Q = U \cdot A \cdot (T_1 - T_2)$$

Q - קצב זרימת החום [WATT]

A - שטח רכיב הבנייה [SQ.M]

T<sub>1</sub> - טמפרטורה בצד החם של הרכיב [DEG.C]

T<sub>2</sub> - טמפרטורה בצד הקר של הרכיב [DEG.C]

U - מוליכות תרמית של הרכיב [WATT/(SQ.M\*DEG.C)]

הערך המנוגד ל'ערך ה-U' של חומר כלשהו נקרא 'ההתנגדות התרמית' וסימנו:

$$[1.5-B] \quad R = 1/U$$

מעשית ערכי ה-R שימושיים מאוד משום שניתן לסכמם כמו נגדים חשמליים המחוברים בטור וכך לחשב את ערך ה-U האפקטיבי של רכיב דופן הבניין המורכב ממספר שכבות של חומרים שונים:

$$[1.5-C] \quad R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

R<sub>Σ</sub> - התנגדות האפקטיבית של הרכיב [DEG.C\*SQ.M/WATT]

R<sub>1</sub> - התנגדות השכבה הראשונה [DEG.C\*SQ.M/WATT]

R<sub>2</sub> - התנגדות השכבה השנייה [DEG.C\*SQ.M/WATT]

R<sub>n</sub> - התנגדות השכבה ה-N [DEG.C\*SQ.M/WATT]

ערך ה-G של חלל בנוי הוא שקלול של ערכי ה-U של כל רכיבי המעטפת שלו ושטחם. הכפלת ערך ה-G בהפרש הטמפרטורה בין המשטחים החיצוניים לפנימיים של רכיבי המעטפת תבטא את סך כל מעבר החום דרך מעטפת החלל הנדון.

כמות הבידוד הדרושה לסוגי דפנות שונים של מעטפת מבנים נקבעה בארץ בתקן ישראלי (40) והיא מותאמת לארבעה אזורים גיאוגרפיים המגדרים בתקן לפי סוגי האקלים שלהם. בטבלה שבסעיף 1.2 מוצע סיווג שונה במקצת של כל יישובי הנגב לפי אזורי האקלים שבהם הם נמצאים. הסיווג המוצע מבוסס על גובהם של

### דוגמאות

א. חלון זכוכית:  $U = 6.25 \text{ WATT}/(\text{SQ.M*DEG.C})$   
 לוח זכוכית בעל שטח של 2 מ"ר המפריד בין שני חללים אשר באחד מהם הטמפרטורה היא 18 מעלות צלזיוס ובשני 10 מעלות צלזיוס תאפשר זרימת חום בקצב של

$$Q = 6.25 \cdot 2 \cdot (18-10) = 100 \text{ WATT}$$

ב. בלוק בטון 20 ס"מ, חלול:  $U = 3.30 \text{ [WATT}/(\text{SQ.M*DEG.C})]$   
 קיר ששטחו 2 מ"ר של בלוקים כאלה, המפריד בין אותם חללים כמו בדוגמה הקודמת (א) יאפשר זרימת חום בקצב של

$$Q = 3.30 \cdot 2 \cdot (18-10) = 52.8 \text{ WATT}$$

ג. בידוד פליסטיין בעובי 5 ס"מ:  $U = 0.60 \text{ [WATT}/(\text{SQ.M*DEG.C})]$   
 קטע ששטחו 2 מ"ר של פליסטיין בתנאים הנ"ל יאפשר זרימת חום בקצב של

$$Q = 0.60 \cdot 2 \cdot (18-10) = 9.6 \text{ WATT}$$

דוגמה: קיר בלוק בטון 20 ס"מ חלול, מכוסה שכבת פליסטיין 5 ס"מ בעובי.

$$R \text{ (בלוק)} = 1/(3.3) = 0.303 \text{ DEG.C*SQ.M/WATT}$$

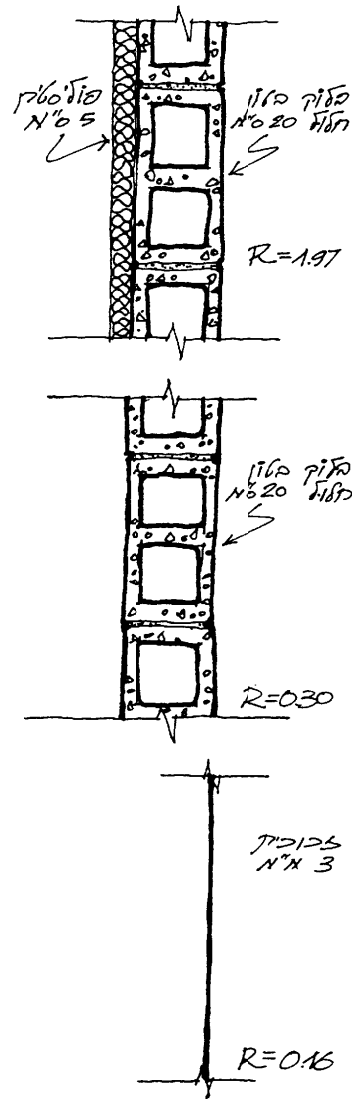
$$R \text{ (בידוד)} = 1/(0.6) = 1.667 \text{ DEG.C*SQ.M/WATT}$$

$$R \text{ (כללי)} = R \text{ (בלוק)} + R \text{ (בידוד)} = 1.97 \text{ DEG.C*SQ.M/WATT}$$

$$U \text{ (כללי)} = 1/R = 0.51 \text{ WATT}/(\text{SQ.M*DEG.C})$$

ניתן לראות שקיר מורכב כזה בעל שטח של 2 מ"ר המפריד בין חללים שבהם הפרש הטמפרטורה הוא 8 מעלות יאפשר זרימת חום של  $Q = 8.1$  ואט, הנמוכה במקצת מהערך שחושב לעיל בדוגמת הפליסטיין לבד, כפי שניתן היה לצפות.

ציור 1-27  
 התנגדות תרמית של חומרים



היישובים מעל פני הים, כמוגדר בסעיף 1.2. תשומת לב מיוחדת יש להקדיש ליישובים הנמצאים באזורים גבוליים של אזורי האקלים המוצעים. ככלל, במקומות שקיים ספק לגביהם, עדיף להגדיל את מידת הבידוד מאשר להקטינה. ההשפעה של בידוד יתר על עלות הבניין היא שולית, ובדרך כלל זניחה.

## 1.6 מסת הבניין

### כמות החומר אוגר האנרגיה במעטפת הבניין ובמחיצותיו ומיקומו ביחס לבידוד משמעותית על תנאי הנוחות במבנה.

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, 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 שצריכת החשמל הארצית נמוכה. מסת הבניין תאצור בתוכה את החום או הקור, ותוכל להבטיח נוחות תרמית גם בשעות שיא של צריכת החשמל.

באשר למבנים קלים, כמו בנייני עץ, הרי אלה מגינים במהירות לשינויי טמפרטורה חיצוניים ופנימיים: בניין קל מבודד היטב יחמם מהר על ידי תנור חימום, מה שיכול להיחשב כיתרון, אולם כאשר יטובה התנור, תרד טמפרטורת החדר במהירות יחסית ויגרמו שינויי טמפרטורה חדים הנחשבים בלתי נוחים. תופעה דומה תקרה בעת שיקורד המבנה בקיץ: מזגן פועל יקררו 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. עקב כך 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. זופן של בניין כבד יכולה להפוך לבעלת תכונות של בניין קל (מבחינה תרמית), אם יורכב הבידוד בצד הפנימי של המעטפת. גם תופעה זו ניתנת לנצל במקומות המתאימים. למשל: במקרים של אולמות ציבוריים הפועלים מספר שעות קטן בשבוע, ואשר בהם דרוש מיזוג אוויר, 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 תשאר אנרגיה אצורה במסת הבניין אחרי גמר השימוש.

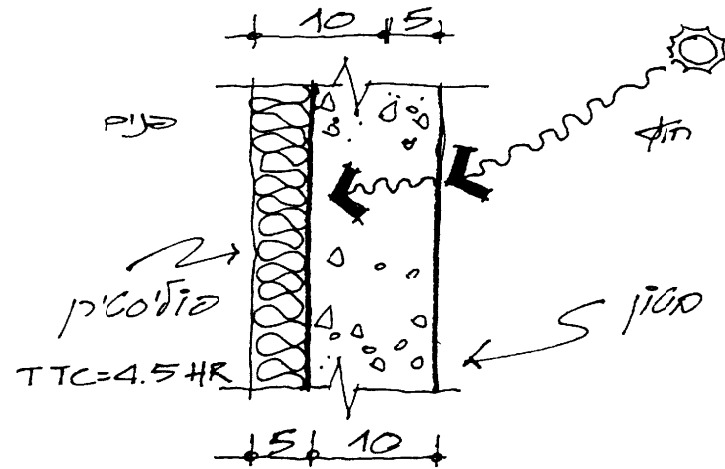
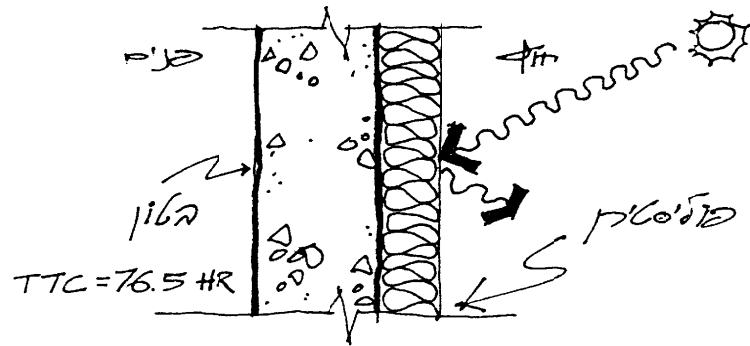
### קבוע הזמן התימי (TTC).

שיטה כמותית להערכת הזמן שלוקח לגל חום לעבור דרך אלמנט מעטפת של בניין נתון היא שיטת TTC (41). המקדם TTC תלוי בעובי, בקיבול החום ובמוליכות התרמית של המרכיבים השונים שבאלמנט. הניסוחאות לחישוב המקדם TTC נמצאות בהקן 1045 (42). אם ניקח לדוגמה קיר בטון בעובי 10 ס"מ ללא בידוד נוסף, אזי ערך ה-TTC הוא כ-4 שעות. תוספת בידוד במשטחו הפנימי של אותו קיר כמעט לא תשנה את הזמן האופייני להדירת גל חום פנימה. לעומת זאת, תוספת בידוד במשטחו החיצוני של הקיר תגדיל את ערך ה-TTC באופן משמעותי. בטבלה 1-4 מופיעים ערכי ה-TTC עבור קירות בטון בעובי 10 ו-20 ס"מ בתוספת כמויות שונות של בידוד פנים או חוץ.

41. Hoffman M.E. & Feldman M., 1981, pp. 71-85

42. תקן ישראלי 1045.





טבלה 4-1: ערכי ה-TTC (בשעות) עבור קירות בטון בעובי 10 ס"מ ו-20 ס"מ לפי עובי הבידוד והמיקום שלו כלפי פנים או חוץ

עובי הבידוד (בידוד בחוץ)						עובי הבטון [CM]
5 CM	4 CM	3 CM	2 CM	1 CM	0 CM	
76.5	62.0	47.6	33.1	18.7	4.3	10
155.5	126.6	97.7	68.9	40.1	11.2	20

עובי הבידוד (בידוד בפנים)						עובי הבטון [CM]
5 CM	4 CM	3 CM	2 CM	1 CM	0 CM	
4.5	4.4	4.4	4.3	4.3	4.2	10
11.5	11.4	11.4	11.3	11.3	11.2	20

**1.7 תופעות דינמיות של מסת הבניין (43)**

בנוסף לערכה הסטטי כמבודד (ערך שולי) יחסית לעוביו של רכיב הבניין - עשויה מסת הבניין למלא תפקיד דינמי חשוב במיתון תנאי הנוחות. תפקיד זה מודגם יפה באמצעות תופעת תנודת הטמפרטורה היומית על פני המשטח החיצוני של רכיב בניין כלשהו, כגון קיר או גג. פתרון משוואת פיזור החום בהתייחס לגל חום הנוגע במחזוריות (44) מלמד על ארבע תופעות חשובות.

**1.7.1 מיתון תנודת הטמפרטורה היומית**

קיר החשוף בצדו החיצוני לתנודת טמפרטורה מחזורית בין היום לבין הלילה, הדומה לזה המתרחש בקיץ, ממתן את המשרעת של גל חום זה בעוברו דרך הקיר אל פנים הבניין.

מקדם ההנחתה ( $Z_1$ ) הוא

[1.7-A] 
$$Z_1 = e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2} * \frac{d}{\alpha}}} \quad \left[ Z_1 = \frac{e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2} * \frac{d}{\alpha}}}}{\frac{\omega d^2}{2\alpha}} = e^{-\frac{2d}{\omega d^2}} \right]$$

d - עובי רכיב הבניין [M]  
 $\omega$  - מחושב לפי

[1.7-B] 
$$\omega = \frac{2\pi}{24(\text{HRS}/\text{DAY}) * 60(\text{MINS}/\text{HR}) * 60(\text{SEC}/\text{MIN})} \quad [\text{HZ}]$$

וערכו  $\omega = 7.37 * 10^{-5}$

$\alpha$  מקדם פיזור חום (thermal diffusivity) מחושב לפי

[1.7-C] 
$$\alpha = \frac{K}{\rho * C} \quad [\text{SQ.M}/\text{SEC}]$$

$$\alpha = \frac{K}{\rho * C}$$

$$\frac{J}{m^2 * ^\circ C}$$

- $\rho$  צפיפות [KG/CU.M]
- C חום סגולי [J/(KG\*DEG.C)]
- K מוליכות חום [W/(M\*DEG.C)]
- d עובי מרכיב הבניין [M]

leg. m<sup>2</sup>.  
 $\frac{J}{m^2 * ^\circ C} = \frac{J}{m^2 * ^\circ C} \cdot \frac{1 \text{ Day}}{1 \text{ Day}}$

43. פרק זה נכתב על ידי פרופ' ד' פיימן ופרופ' י' ארמו.

Carslaw H.S. & Jaeger J.C., 44. 1978.

**דוגמה 1:** 20 ס"מ בטון

$K = 2.1 \text{ W}/(\text{M} * \text{DEG.C})$   
 $\rho = 2400 \text{ KG}/\text{CU.M}$   
 $C = 864 \text{ J}/(\text{KG} * \text{DEG.C})$

לכן  $\alpha = 1.01 * 10^{-6} \text{ SQ.M}/\text{SEC}$   
 $\omega = 7.37 * 10^{-5} \text{ HZ}$

על כן מקדם ההנחתה יהיה בערך 0.3.

כך, אם תנודת הטמפרטורה היומית בצדו החיצוני של הקיר שווה לדוגמה ל-40 מעלות צלסיוס, התנודה המקבילה בצדו הפנימי של הקיר יהיה שווה בערך ל 12 מעלות צלסיוס.

**דוגמה 2:** 20 ס"מ איטונג

$K = 0.2 \text{ W}/(\text{M} * \text{DEG.C})$   
 $\rho = 650 \text{ KG}/\text{CU.M}$   
 $C = 972 \text{ J}/(\text{KG} * \text{DEG.C})$

לכן  $\alpha = 3.17 * 10^{-7} \text{ SQ.M}/\text{SEC}$   
 $\omega = 7.37 * 10^{-5} \text{ HZ}$

מקדם ההנחתה יהיה בערך 0.1.

איטונג בעובי זהה לזה של הבטון הוא בעל מקדם הנחתה גדול יותר, מכיוון שפיזור החום שלו ( $\alpha$ ) קטן יותר. במקרה זה תנודת טמפרטורה יומית של 40 מעלות צלסיוס בחוץ תופיע בסך הכל כמשרעת פנימית של 4 מעלות צלסיוס.

**דוגמה 3:** 4 ס"מ פוליסטיירן

$K = 0.04 \text{ W}/(\text{M} * \text{DEG.C})$   
 $\rho = 20 \text{ KG}/\text{CU.M}$   
 $C = 1440 \text{ J}/(\text{KG} * \text{DEG.C})$

לכן  $\alpha = 1.39 * 10^{-6} \text{ SQ.M}/\text{SEC}$   
 $\omega = 7.37 * 10^{-5} \text{ HZ}$

מקדם ההנחתה יהיה בערך 0.6. 4 ס"מ פוליסטירן הם בעלי התנגדות תרמית סטטיה (R) זהה לא של 20 ס"מ איטונג אך כושר ההנחתה התרמית שלו גרוע פי שש מזה של האיטונג.

קיר מסוג 'סנדוויץ', המורכב מ-20 ס"מ בטון ומ-4 ס"מ פוליסטירן יהיה בעל מקדם הנחתה השווה בערך ל-0.2 = 0.3\*0.6, כלומר יהיה עדיין נחות מבחינה יכולת ההנחתה מקיר של 20 ס"מ איטונג.

דוגמת 1: 20 ס"מ בטון

$$\alpha = 1.01 \cdot 10^{-6} \text{ SQ.M/SEC}$$

$$\omega = 7.37 \cdot 10^{-5} \text{ HZ}$$

לכן זמן ההסטה שווה ל-4.6 שעות.

אז, אם טמפרטורת החוץ מגיעה לערכה המקסימלי בשעה 14:00 לדוגמה, גל החום הפנימי (המנותן) יגיע לערכו הגבוה בערך בשעה 18:30.

דוגמת 2: 4 ס"מ פוליסטירן

$$\alpha = 1.39 \cdot 10^{-6} \text{ SQ.M/SEC}$$

$$\omega = 7.37 \cdot 10^{-5} \text{ HZ}$$

לכן יהיה זמן ההסטה 1.1 שעה.

דוגמת 3: 20 ס"מ איטונג

$$\alpha = 3.17 \cdot 10^{-7} \text{ SQ.M/SEC}$$

$$\omega = 7.37 \cdot 10^{-5} \text{ HZ}$$

לכן יהיה זמן ההסטה 8.2 שעות.

איטונג גרם להסדת טמפרטורה גדולה בהרבה מזה של כמות שווה של בידוד פוליסטירן (סטאטי) מטון שעוביו (d) גדול יותר.

איטונג גם גרם להפיש פאזה גדול בהרבה מזה של עובי שווה של בטון, מכיון שהוא בעל פיזור חום ( $\alpha$ ) קטן בהרבה. קיר מסוג 'סנדוויץ' המורכב מ-20 ס"מ בטון ו-4 ס"מ פוליסטירן יגרום לזמן הסטה של 4.6 + 1.1 שעות, כלומר קטן מזה של 20 ס"מ איטונג.

אם רכיב הבניין הוא מורכב ('סנדוויץ'), משפיעה ההנחתה על ידי כל שכבה באופן מצטבר; כלומר: ההנחתה של קיר דו-שכבתי תהיה:

$$Z_2 = e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2} \left( \frac{d_1}{\alpha_1} + \frac{d_2}{\alpha_2} \right)}}$$

[1.7-D]

### 1.7.2 הסטה בזמן של טמפרטורות המקסימום/מינימום

כאשר גל חום עובר דרך עובי רכיב הבניין, ישנו איחור בהשפעתו בצד השני של הרכיב. תופעה זו גורמת להסטה בזמן הערכים הקיצוניים של הטמפרטורה הפנימית ביחס לטמפרטורה החיצונית.

משך ההסטה מבוטא על ידי

$$T_1 = \sqrt{\frac{d}{2 \alpha \omega}} \quad [\text{SEC}]$$

[1.7-E]

כאשר רכיב הבניין הוא 'סנדוויץ', זמני ההסטה של כל שכבה משפיעים באופן מצטבר. למשל: ההסטה עבור קיר דו-שכבתי יחשב על ידי המשוואה

$$T_2 = \sqrt{\frac{d_1}{2 \alpha_1 \omega}} + \sqrt{\frac{d_2}{2 \alpha_2 \omega}} \quad [\text{SEC}]$$

[1.7-F]

כלומר: סכום הפרשי ההסטה של כל שכבה.

הערות - תאריך

הם אינן חלולות 30/10/2018

### 1.7.3 עומק החדירה

תכונה דינמית שלישית של מסת הבניין מקבלת חשיבות מיוחדת במקרה של חימום סולארי פסיבי. במקרה זה מעטפת הבניין מבודדת היטב (או לפחות צריכה להיות כך), ואנרגיית השמש חודרת פנימה בפועל אך ורק דרך חלונות הבניין או דרך פתחים אחרים מתוכננים לשם כך. במקרה זה מתרחש חימום מחזורי של פנים הבניין ויש צורך בשילוב של מסה תרמית לאגירה לצורך ניצולה בשעות הלילה. הפרמטר החשוב כאן הוא **עומק החדירה** של האנרגייה לתוך עובי הקיר או הרצפה.

עומק החדירה שווה

$$P = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad [M] \quad (1.7-G)$$

במונחים פיסיקליים 'עומק החדירה' הוא המרחק מפני החומר שבו נמדדת טמפרטורה הקטנה פי  $1/e$  מהטמפרטורה על המשטח החיצוני. מעשית, פירושו של דבר המרחק הנדרש כדי למתן את ערך הטמפרטורה בעומק החדירה ל-37% מערכה בחוץ.

### 1.7.4 קיבולת חום יומית

ניתן לחשב בקירוב את כמות האנרגייה האצורה ברכיב בניין שבו 'עומק החדירה' הוא  $d$ , בהסתמך על רכיב דומה (רכיב התייחסות) שעוביו  $d$ , והנתון כולו בטמפרטורה אחידה השווה לטמפרטורה לה חשוף המשטח החיצוני של הרכיב הנבדק. כמות האנרגייה האגורה ברכיב הנבדק תהיה 0.63 מכמות האנרגייה האגורה ברכיב ההתייחסות. כמות האנרגייה היותר קטנה האצורה ברכיב הנבדק נובעת מהירידה בטמפרטורות הנמדדות בו מפני המשטח החיצוני פנימה. ירידות אלה אינן ליניאריות.

**דוגמה 1:** בטון

$$\alpha = 1.01 \cdot 10^{-6} \text{ SQ.M/SEC}$$
$$\omega = 7.37 \cdot 10^{-5} \text{ HZ}$$

לכן עומק החדירה שווה בערך ל-17 ס"מ.

12

**דוגמה 2:** איטונג

$$\alpha = 3.17 \cdot 10^{-7} \text{ SQ.M/SEC}$$
$$\omega = 7.37 \cdot 10^{-5} \text{ HZ}$$

לכן עומק החדירה שווה בערך ל-9 ס"מ.

התוצאות מצביעות על כך שתשימת אנרגיית השמש היומית חודרת בערך פי שניים עמוק יותר לתוך הבטון מאשר לתוך האיטונג.

**דוגמה 1:** 17 ס"מ בטון

$$\text{חום סגולי: } 864 \text{ J/(KG*DEG.C)}$$

לכן קיבולת החום היומית היא

$$0.63 \cdot 0.17 \cdot 864 \cdot 2400 = 0.06 \text{ KWH/(SQ.M*DEG.C)}$$

**דוגמה 2:** 9 ס"מ איטונג

$$\text{חום סגולי: } 972 \text{ J/(KG*DEG.C)}$$

לכן קיבולת החום היומית

$$0.63 \cdot 0.09 \cdot 972 \cdot 600 = 0.009 \text{ KWH/(SQ.M*DEG.C)}$$

ניתן לראות כי הבטון הוא אמצעי טוב בהרבה לאגירה פסיבית של אנרגיית שמש מאשר האיטונג.

בגלל הידידת האקסטנציונאלית של הטמפרטורה בתוך הרכיב עם הותרחקות מפניו, מסתבר שמספר הסנטימטרים הקרובים לפני הרכיב חשונים בהרבה מאלה הרחוקים מפניו. לדוגמה, בקיר בטון 14 הקרובים לפני הרכיב יאגרו 90% מכלל האנרגייה האגורה מדי יום ו-10 הסנטימטרים היותר קרובים אל פני הרכיב יאגרו 71% מאנרגייה זו.

### 1.7.5 זמן תגובה תרמית (לשינוי פתאומי במזג האוויר)

עד תכונה דינאמית של המסה התרמית שהיא בעלת עניין (בעיקר אקדמי) היא הזמן המקורב שנדרש למשטח פנימי של רכיב בניין כדי להגיב לשינוי פתאומי בתנאים החיצוניים אליהם חשוף משטחו החיצוני. לדוגמה: תקופת של כמה ימים נעימים עלולה להיפסק פתאום על ידי גשם. במקרה זה זמן התגובה התרמית של רכיב הבניין יהיה שווה

$$TR = \frac{d^2}{\alpha} \quad [1.7-H]$$

יש להזהר ולא לבלבל את זמן התגובה התרמית עם ההסטה של הטמפרטורות הקיצוניות שהוזכר בחלק השני לעיל, תכונה שהינה בעלת חשיבות גדולה בהרבה מזו של זמן התגובה התרמית.

### 1.7.6 מיתון האקלים הפנימי של הבניין

מבחינה פיסיקלית בכל החישובים המובאים לעיל, אין לסדר בו מורכבים רכיבי הקיר השפעה על התוצאה החישובים וזאת משום שמדובר בהתנהגות של רכיב בניין בודד הנתון להשפעת גל חום בצדו החיצוני. אולם בניין שלם הוא מערכת הפועלת בצורה שונה מזו שפועל כל אחד מרכיביה לכשעצמו. לכן לשם מיתון האקלים הפנימי של הבניין חשוב שסדר הרכיבים בקיר יהיה בידוד בחוץ ומסה בפנים. הסיבה לכך היא משום שהמסה היא הגורם העיקרי באגירה ובמיתון התנודות היומיות של אנרגיית החוזרת פנימה (חום השמש דרך החלונות והשפעת אוויר הסביבה החודר דרך פתחים או סדקים), ומיקומה בצד החיצוני של הקיר יבטל את תרומתה כמאגר אנרגייה בפנים הבניין.

**דוגמה 1:** 20 ס"מ בטון

זמן התגובה התרמית שווה בערך ל-10 שעות.

**דוגמה 2:** 20 ס"מ איטונג

זמן התגובה התרמית שווה בערך ל-35 שעות.

## 1.8 צבע המעטפת

הצבע החיצוני של מעטפת הבניין הוא גורם חשוב ביותר במאזן האנרגיה שלו. טמפרטורת המשטח החיצוני של מעטפת הבניין תעלה מעל טמפרטורת הסביבה, ככל שתיספג בו יותר קרינת שמש.

תרומת קרינת השמש לעליית הטמפרטורה של משטח חשוף לקרינת שמש משתקפת בנוסחה

$$[1.8-A] \quad T_s = T_{ex} + \frac{I \cdot \alpha}{H_o}$$

$T_s$  - טמפרטורת המשטח החיצוני [DEG.C]  
 $T_{ex}$  - טמפרטורת האוויר מחוץ לבניין [DEG.C]  
 $I$  - שטף קרינת השמש על המשטח [WATT/SQ.M]  
 $\alpha$  - מקדם הבליעה של המשטח  
 $H_o$  - מקדם המוליכות התרמית השטחית [WATT/(SQ.M\*DEG.C)]

המקדם  $H_o$  תלוי במהירות הרוח  $v$ , וביטוי (47):

$$[1.8-B] \quad H_o = 5.7 + (3.80 \cdot v)$$

$v$  - מהירות הרוח [M/SEC]

Anderson B., 1977 .45

Gubareff G.G. et al., 1960 .46

McAdams W.C., 1954 .47

טבלה 1-5: מקדם הבליעה  $\alpha$  ומקדם הפליטה  $\epsilon$  של משטחים שונים

מקור	$\epsilon$	$\alpha$	סוג המשטח
(45)	0.91	0.07	גבס לבן
(45)	0.24	0.22	סיד לבן
(46)	0.90	0.25	צבע שמן לבן (מבריק)
(46)	0.90	0.30	צבע שמן לבן (מט)
(46)	0.90	0.47	צבע שמן ירוק בהיר
(46)	0.90	0.51	צבע שמן כחול בהיר
(46)	0.90	0.57	צבע שמן צהוב בינוני
(46)	0.90	0.58	צבע שמן כתום בינוני
(45)	0.96	0.59	לוח אסבסט לבן
(45)	0.88	0.60	בטון
(45)	0.98	0.65	דשא
(45)	0.90	0.70	שטח מדברי
(46),(45)	0.92	0.70	לבנים אדומים
(46),(45)	0.90	0.74	צבע שמן אדום
(46),(45)	0.95	0.75	צבע שמן אפור בהיר
(46)	0.90	0.80	צבע שמן חום בהיר בינוני
(45)	0.28	0.80	ברזל מגולוון חלוד
(46)	0.90	0.88	צבע שמן חום כהה
(45)	0.90	0.90	צבע שמן שחור (מבריק)
(45)	0.93	0.93	אספלט
(45)	0.93	0.93	נייר זפת שחור
(46),(45)	0.88	0.95	צבע שמן שחור (מט)

### דוגמה:

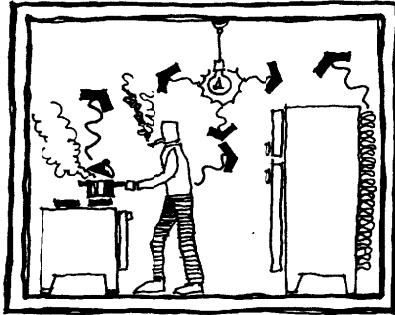
מהי הטמפרטורה של פלטה ברזל מגולוון חלוד, כשטמפרטורת האוויר 40 מעלות צלזיוס, מהירות הרוח 3.0 מטרים/שנייה ועונמתה של קרינת השמש 1000 וואט/מ"ר?

פתרון: מנסחה [1.8-B] -  $H_o = 17.1$  [WATT/(SQ.M\*DEG.C)]

מהטבלה  $\alpha = 0.80$

לכן מנסחה [1.8-A] -  $T_s = 86.8$  [DEG.C]

אז רואים מדוגמה זו שספיגה של קרינת השמש מעלה את טמפרטורת המשטח החיצוני ב-46.8 מעלות צלזיוס מעל לטמפרטורת האוויר.



טבלה 6-1: מקורות חום אופייניים למשפחה  
בה 5 נפשות בנגב

מקור החום	כמות האנרגיה [KWH/DAY]
בישול	2.0
תאורה	2.0
מכשירי חשמל	4.0
* חום גוף בני אדם	7.0

\* 100 ואט לנפש, 5 נפשות בבית במשך  
14 שעות ביממה.

הטבלה מראה ערכים שונים של מקורות  
חום בבית שמתגדרות בו 5 נפשות.  
מספרים אלה מסתכמים ל-465 ק"ש במשך  
31 יום בחודש. בספרות המקצועית (48)  
מופיעות טבלאות שימושיות של חום  
ממוצע הנובע מכל מיני מקורות  
פנימיים.

.48 ASHRAE 1978, pp. 25.17-25.19

## 1.9 מקורות חום פנימיים

**בכל בניין הנמצא בשימוש מצויים כמה מקורות חום פנימיים  
שיש לקחת בחשבון, כאשר מתכננים את מערכת החימום או  
הקירור.**

דוגמאות: החום הנובע ממכשירים חשמליים, החום הנובע מתאורה מלאכותית והחום  
הנובע מנוכחותם של אנשים בבניין. בחורף אנרגיה זו עוזרת להקטנת הצורך  
בחימום הבניין, אולם בקיץ היא מהווה נטל בלתי רצוי של אנרגיה אשר יש  
לנטרלו בדרך כלשהי.

## 1.10 פתחים

### חשיבות מכרעת בהשגת הנוחות התרמית בבניין יש לגודל ולמיקום הפתחים המזוגגים.

פתחים מזוגגים גדולים הפונים דרומה חשובים באזורים שבהם דרוש חימום בחורף. בעונה זו של השנה הימים קצרים ותנועת השמש היא מדרום-מזרח לדרום-מערב, והיא חולפת נמוך, יחסית, בדרום השמים. בחורף באזורים ב' ו-ג' עשויים פתחים מזוגגים גדולים, הפונים דרומה, לספק כמויות משמעותיות של חימום סולארי פסיבי.

בקפי, לעומת זאת, הימים ארוכים והשמש, בדרכה מצפון-מזרח לצפון-מערב, עוברת גבוה בשמים. בשל כך כמויות גדולות של קרינה סולארית (בלתי רצויה) פוגעות בקירות המזרחיים והמערביים של הבניין ובגג. בגג יש להימנע מבניית בניינים בעלי פתחים מזוגגים גדולים בחזיתותיהם המזרחיות והמערביות.

טבלה 7-1: קרינת שמש ממוצעת [KWH/(SQ.M\*DAY)] על קירות דו־ימיים, מזרחיים/מערביים, צפוניים ועל הגג לפי חודש, במרכז הנגב (עבודת)

חודש	דרום	מזרח/מערב	צפון	גג איפקי
ינואר	4.63	2.54	1.08	3.33
פברואר	4.15	2.86	1.32	3.92
מרץ	3.60	3.32	1.63	4.69
אפריל	3.22	4.24	1.98	6.19
מאי	2.75	4.88	2.30	7.31
יוני	2.53	5.19	2.83	7.89
יולי	2.62	5.07	2.48	7.67
אוגוסט	3.14	4.83	2.21	7.11
ספטמבר	3.94	4.18	1.89	5.94
אוקטובר	4.94	3.61	1.44	4.92
נובמבר	5.40	3.03	1.15	3.94
דצמבר	3.86	2.08	0.98	2.75

הטבלה מראה כמויות הקרינה הכוללת, הפוגעות בקירות השונים ובגג של המבנה, בכל אחד מחודשי השנה. הערכים מבוססים על סטטיסטיקה של קרינה סולארית כוללת מאזור עבודת (49), בהנחה שמקום התחזרה (אלבדו) הטיפוסי למדבר הוא 0.3, ובעזרת סימולציה (50). מספרים אלה יכולים לשרת זמנית את כל הנגב, עד שיפיעו נתונים מקומיים מדויקים יותר.

49. Evenari M. et al., 1987

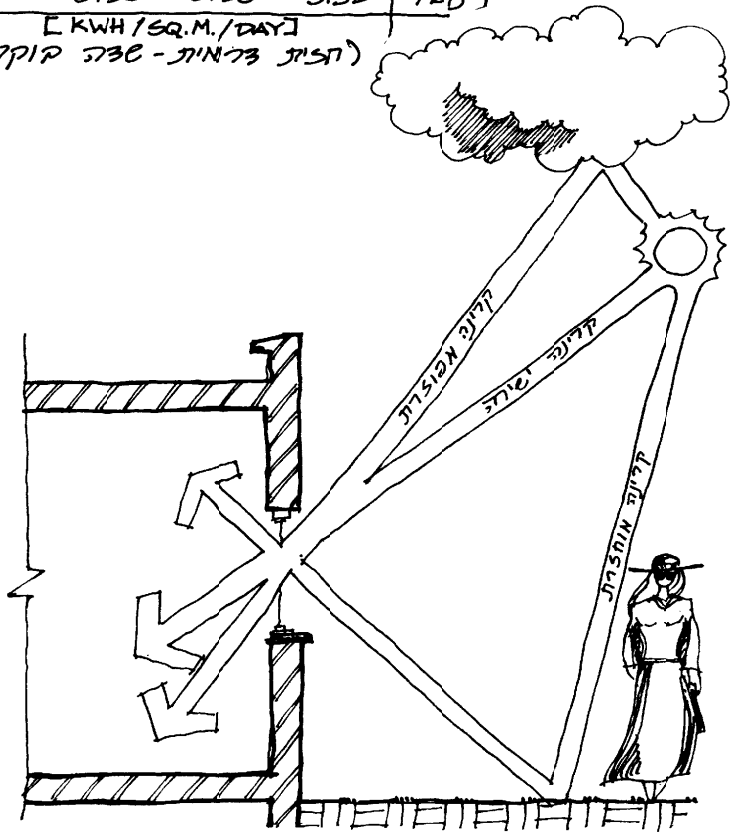
50. Klein S.A., 1977, p. 325  
שם, 1978, עמ' 441.



ציור 1-28  
קרינה ישירה, מפוזרת ומוחזרת החדרת דרך חלון

שירות אורזות ס'ג				קרינה חמה
2.62	1.15	0.99	0.49	יחי
4.63	0.50	0.58	3.55	יג'ג

[KWH / SQ.M. / DAY]  
(חשיט בלחית - צב' קוקר)



## 1.11 הצללה

**נתוני קרינת השמש בקיץ ממחישים, שהזירת אנרגיית שמש בלתי רצויה דרך חלונות הבית גורמת לעליית עומס הקירור בצורה משמעותית.**

אפשר להקטין עלייה זו על ידי שימוש במתקני הצללה חיצוניים, מתוכננים בהתאם. תכנון נכון של מתקני הצללה דורש הבנה של החשיבות היחסית של רכיבי הקרינה (ישירה, מוחזרת מן הקרקע ומפוזרת מן השמים) בזמנים שונים של השנה.

### 1.11.1 קרינה ישירה

אפשר למנוע חדירת קרינה ישירה מבעד לחלון על ידי שימוש במדפים זיזיים מעל החלון ו/או בצדדיו. מידות מדפים אלה ייקבעו מתוך שיקולים גיאומטריים (ראה פרק 2.6). טבלה 1-8 מראה את מצב השמש בכל שעה של היום ה-21 בכל חודש. מצבי השמש מסומנים על ידי רום השמש ALT מדוד במעלות מעל האופק וזווית האזימוט AZ, מודדה במעלות מכיוון דרום. הזווית בטבלה נכונות לגבי קו הרוחב של מרכז הנגב (30.8 מעלות) אולם השימוש בהן מדויק די הצורך לגבי הנגב כולו. יש לשים לב שמצבי השמש הנתונים בטבלה מתייחסים לשעות לפני הצהריים בלבד, משום ששעות אחר הצהריים סימטריות להן סביב 12:00. את קואורדינטות השמש לגבי תאריכים ושעות אחרים אפשר לחשב בקירוב על ידי אינטרפולציה פשוטה בין המספרים בטבלה.

### 1.11.2 קרינה מפוזרת ומוחזרת

בנוסף לקרינה הישירה שכבר דנו בה, חודרת מבעד לפתח גם קרינה המוחזרת מהקרקע ומהשמים. שני סוגי קרינה אלה מגיעים בו זמנית מכיוונים רבים. הדרך היחידה לבלום קרינה זו היא כיסוי הפתח. השפעתם של סוגי קרינה אלה רבה: בחודש יוני למשל רק כ-15% מכלל הקרינה המגיעה לפתח זרומי היא קרינה ישירה. קרוב ל-85% מהקרינה המגיעה אל הקיר (קרינה מפוזרת ומוחזרת) תחדור דרך הפתח למרות מתקני ההצללה נגד הקרינה הישירה.

**המלצה:** חשוב לכסות בימי הקיץ את כל הפתחים (דרומיים, מזרחיים, מערביים וצפוניים) במידת האפשר כדי להקטין את תרומת הקרינה להתחממות מנים המבנה.

טבלה 9-1: כמויות ממוצעות של קרינת שמש לפי רכיביה [KWH/(SQ.M\*DAY)] על קיר פנימי בכל חודשי השנה במרכז הנגב (עבדת)

חודש	קרינה ישירה	קרינה מפוזרת	קרינה מוחזרת	סה"כ קרינה
ינואר	3.55	0.58	0.50	4.63
פברואר	2.83	0.73	0.59	4.15
מרץ	1.99	0.90	0.71	3.60
אפריל	1.29	1.00	0.93	3.22
מאי	0.64	1.02	1.10	2.75
יוני	0.36	0.98	1.18	2.53
יולי	0.49	0.99	1.15	2.62
אוגוסט	1.15	0.93	1.07	3.14
ספטמבר	2.19	0.86	0.89	3.94
אוקטובר	3.50	0.70	0.74	4.94
נובמבר	4.25	0.56	0.59	5.40
דצמבר	2.88	0.57	0.41	3.86

הטבלה מראה את הכמויות של קרינה ישירה, מפוזרת ומוחזרת, התחדרת מבעד לשטח פנים אנכי הפונה דרומה בכל אחד מחודשי השנה. הערכים מבוססים על סטטיסטיקת קרינה סולארית כוללת מעבדת (52), שעושה שימוש במקדם החזרה (אלבדו) טיפוסי למדבר של 0.3 ובסימולציה (53). מספרים אלה יכולים לשרת זמנית את כל הנגב, עד שיופיעו נתונים מקומיים מדויקים יותר.

Duffie J.A. & Beckman W.A. .51  
1980

Evenari M. et al, op.cit. .52

Klein S.A., op.cit. .53

#### הערות:

א. שעות אחר-הצהריים סימטריות לשעות לפני הצהריים סביב השעה 12:00.

ב. זמן סולארי כנגב נע בין 5 דקות ל-36 דקות לפני זמן שעות (לפי שעות חורף). לצורך עניינינו ניתן להזניח את ההבדל הקטן (כרבע שעה בממוצע) הזה.

ג. הערכים השליליים עבור ALT מציינים את מיקומה של השמש לפני זריחתה, ומסייעים במטרות האינטרנלציה.

דיוקם של הערכים בטבלה הוא בערך מעלה אחת. הספרות העשרוניות מסייעות במטרות האינטרנלציה.

ד. הטבלה חושבה (51) עבור קו הרוחב 30.8 מעלות (בערך מרכז הנגב) אבל ניתן להשתמש בה בכל אזור הנגב.

#### דוגמאות

א. מה הם רום השמש והאימוט שלה בשעה 15:00 ב-21 למרץ?

פתרון: ALT (15:00) = ALT (9:00) = 37.4 DEG

AZ (15:00) = AZ (9:00) = -62.9 DEG

שים לב שהסימן מינוס מצוין שאזיית האימוט היא מערבה לכיוון דרום בשעות אחר הצהריים.

ב. מהו רום השמש בשעת הצהריים ב-1 למרץ?

פתרון: ב-21 לפברואר ALT (12:00) = 48.1 DEG

ב-21 למרץ ALT (12:00) = 59.1 DEG

בתקופה זו אזיית הרום גדלה בקצב 11/28 מעלות ליממה, לכן (בערך)

ב-1 למרץ ALT (12:00) = 51.2 DEG

הערך המחושב צריך להיות 50.8 מעלות, אך דיוק האינטרנלציה בדוגמה מספיק עבור מטרות אלה.

דוגמה: בית חד קומתי, מלבני ששטחו 100 מ"ר וגובהו הפנימי (מהצפה לתקרה) הוא 3 מ'. הבית אטום טוב יחסית. יש לו חדירת אוויר בקצב של 1 החלפת אוויר אחת בשעה.

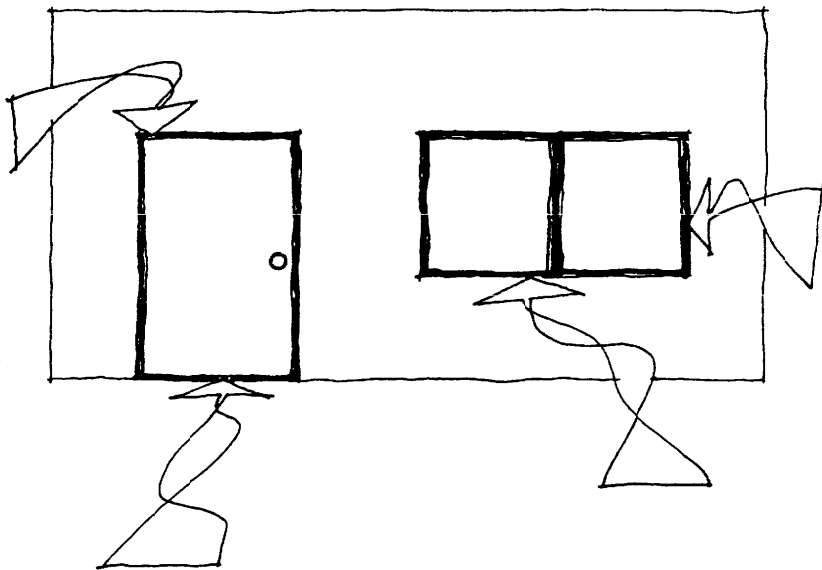
$$N = 1$$

$$V = 300 \text{ [CU.M]}$$

$$\frac{Q}{\Delta t} = 0.3 * 1 * 300 = 90 \text{ WATT/DEG.C [1.12-A]}$$

אם הטמפרטורה בתוך הבית היא 18 מעלות צלסיוס ובחוץ הטמפרטורה היא 10 מעלות אז קצב איבוד החום עקב חדירת אוויר יהיה  $90 * (18-10) = 720 \text{ WATT}$ . אם טמפרטורות אלה מייצגות ממוצע של תנאי טמפרטורה במשך חודש של 31 ימים, אז חדירה (קטנה יחסית) יז תצרך 536 ק"ש נוספים של חימום.

צויר 1-29  
חדירת אוויר לבניין



## 1.12 חדירת אוויר

גורם חשוב במאזן האנרגיה של בניין הוא האוויר החודר לתוכו. כמות מסוימת של אוויר טרי דרושה מסיבות בריאותיות, אך חדירת כמות אוויר רבה מדי יכולה לגרום לאיבוד חום או לחילופין לחימום יתר.

שיטה פשוטה להערכת חילופי חום פנים/חוץ בשל חדירת אוויר מבוטאת על ידי:

$$[1.12-A] \quad Q = 0.3 * N * V * \Delta t$$

N - מספר חילופי האוויר בשעה [ACH]

V - נפח חלל האוויר [CU.M]

0.3 - החום הסגולי הנפחי של אוויר [WATT-HR/(CU.M\*DEG.C)]

$\Delta t$  - הפרש הטמפרטורה בין חוץ לבין פנים

### 1.13 נתונים אקלימיים לחישוב עומס חימום וקירור

קיימות שיטות שונות לחישובי עומס חימום וקירור (54) ושיעור האנרגיה הסולארית שניתן לנצל במתקנים סולאריים פסיביים שונים (55). עבור כל השיטות האלה יש צורך לדעת מספר פרמטרים אקלימיים מקומיים.

#### 1.13.1 טמפרטורת האוויר

אפשר להעריך את טמפרטורת הסביבה הממוצעת בכל חודש נתון ועבור כל אתר בנגב בטכניקה המבוססת על אינטרפולציה (56) בין מקומות בנגב שלגביהם קיימים נתונים. בפרט לגבי חודש ינואר - בדרך כלל החודש הקר ביותר בנגב - הטמפרטורה המקסימלית היומית הממוצעת והטמפרטורה המינימלית היומית הממוצעת מובעות בקירוב בביטויים (56)

$$[1.13-A] \quad T_{\max} = 18.0 + (0.01 * A) - (0.59 * B) \text{ [DEG.C]}$$

$$[1.13-B] \quad T_{\min} = 5.5 - (0.44 * B) + (0.022 * C) \text{ [DEG.C]}$$

הביטויים המתאימים לחודש אוגוסט - בדרך כלל החודש החם ביותר בשנה - הם (56)

$$[1.13-C] \quad T_{\max} = 32.8 + (0.036 * A) - (0.60 * B) \text{ [DEG.C]}$$

$$[1.13-D] \quad T_{\min} = 20.7 + (0.029 * A) - (0.85 * B) \text{ [DEG.C]}$$

A - המרחק מחוף הים התיכון [KM]

B - הגובה מעל פני הים במאות מטרים [M/100]

C - קו האורך בק"מ לפי רשת ישראל [KM]

נוסחאות מקבילות ל-[1.13-A] עד [1.13-D] קיימות (56) עבור כל חודשי השנה.

דוגמה: באר-שבע בחודש ינואר:

מרחק מחוף הים התיכון: KM 46    לכן A = 46  
גובה מעל פני הים: M 280    לכן B = 2.8  
קו אורך (ברשת ישראל) KM 130    לכן C = 130

$$T_{\max} = 20.9 \text{ DEG.C} \quad - \text{ [1.13-A] לכן מנוסחה}$$

$$T_{\min} = 7.1 \text{ DEG.C} \quad - \text{ [1.13-B] ומנוסחה}$$

דוגמה: אילת בחודש אוגוסט:

מרחק מחוף הים התיכון: KM 205    לכן A = 205  
גובה מעל פני הים: M 10    לכן B = 0.1  
קו אורך (ברשת ישראל): KM 145    לכן C = 145

$$T_{\max} = 40.1 \text{ DEG.C} \quad - \text{ [1.13-C] לכן מנוסחה}$$

$$T_{\min} = 26.1 \text{ DEG.C} \quad - \text{ [1.13-D] ומנוסחה}$$

ASHRAE, 1978, chaps. 24 & 25 .54

Gordon J.M. & Zarmi Y., 1981 .55  
pp. 331-348

.56 משאלי ל, 1980.

### 1.13.2 הלחות היחסית

עוד גורם אקלימי בעל משמעות לחישובי עומס קירור בקיץ הוא הלחות היחסית. הנגב, מטבעו, הוא מקום יבש יחסית. בקיץ כאשר אין גשמים, יורדת הלחות במהירות ככל שמתרחקים לכיוון דרום-מזרח מחוף הים התיכון. שוב, הנתונים הקיימים מעטים, אך בדיקת המידע המתאים המופיע באטלס הנגב (57) מורה על יחס פשוט בין הירידה ברמת הלחות והמרחק מחוף הים התיכון. לחישובי עומס הקירור אפשר להעריך את הלחות היחסית בשעה 14:00, בחודש אוגוסט, על ידי שימוש בביטוי:

$$RH = 65.0 - (0.60 * D) + [0.0018 * (D^2)] \quad [1.13-E] \quad [\%]$$

D - המרחק בק"מ מחוף הים התיכון.

### 1.13.3 קרינת שמש

טבלאות של כמויות חודשיות של קרינת שמש על גבי כל מיני משטחים הוצגו כבר בתת-פרק 1.11. הערכים האלה שוחזרו ממדידות של קרינה כוללת בעבדת (58) מומלץ להשתמש בהם עבור כל הנגב עד שיופיעו נתונים מקומיים מדויקים יותר.

### זוגמאות

א. עין-יהב, D = 120 [KM]

לכן מטסחה [1.13-E] RH = 19%

ב. שדה-בוקר, D = 74 [KM]

לכן מטסחה [1.13-E] RH = 30%

.57 שטרן א' ואחרים, 1986.

.58 Evenari M. et al, op.cit.