

מדינת ישראל • משרד התשתיות הלאומיות • אגף מחקר ופיתוח

נוחות ויזואלית וחיסכון באנרגיה במשרדים עם תאורה טבעית באזורים שטופי שמש

הנחיות למתכננים

פרופ' אביתר אראל ואדריכל ערן קפטן

אדריכלות ובינוי ערים במדבר
המכונים לחקר המדבר ע"ש יעקב בלאושטיין
אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

מדינת ישראל • משרד התשתיות הלאומיות • אגף מחקר ופיתוח

נוחות ויזואלית וחיסכון באנרגיה במשרדים עם תאורה טבעית באזורים שטופי שמש

הנחיות למתכננים

פרופ' אביתר אראל ואדריכל ערן קפטן

גרפיקה: יעקב נהון

אדריכלות ובינוי ערים במדבר • המכונים לחקר המדבר ע"ש יעקב בלאושטיין
אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

יוני 2011

הקדמה

מטרת מדריך זה לספק מידע לאדריכלים, מתכננים וסטודנטים לגבי עקרונות תכנון תאורה טבעית במשרדים בישראל, במטרה לשפר את תכנון התאורה הטבעית ולהביא לשימור אנרגיה. מומלץ לקרוא את המדריך בהתאם לסדר הפרקים, אולם ניתן לעיין גם בפרקים בודדים, כגון פרק 2 הכולל המלצות לגבי תנאי התאורה הרצויים בכדי להשיג נוחות ויזואלית, או פרק 5 המתאר פתרון אדריכלי עקרוני להשגת תאורה טבעית משופרת בבניין. המידע במדריך זה אינו כולל נוסחאות וחישובים מורכבים: לצורך לימוד מעמיק יותר מצורפים קישורים למקורות ומדריכים נוספים.



תוכן העניינים

1	מבוא	1
3	תאורה טבעית משופרת להשגת נוחות ויזואלית	2
3	נוחות ויזואלית	2.1
4	סינוור	▪
6	עוצמת הארה טבעית במשרדים	2.2
6	עוצמת הארה טבעית על גבי משטח אופקי (שולחן עבודה)	▪
6	עוצמת הארה טבעית בסמוך לעיני העובד (אנכית)	▪
7	המלצות למניעת סינוור במשרדים	2.3
7	צמצום הסינוור ע"י מניעת קרינת שמש ישירה בעינים	▪
7	צמצום הסינוור ע"י צמצום ניגודי בהיקות	▪
8	שילוב תכנון תאורה טבעית בתהליך התכנון האדריכלי	3
8	תהליך עקרוני לתכנון תאורה טבעית	3.1
9	תכנון תאורה טבעית באמצעות הדמיות תאורה טבעית	3.2
11	תכנון ראשוני לתאורה טבעית משופרת	4
11	כיווני הפתחים	4.1
18	מיקום גיאוגרפי ותנאי אקלים	4.2
20	הסביבה הקרובה	4.3
20	מיקום חללי העבודה	4.4
21	עומק חללי עבודה	4.5
22	פתרון עקרוני לתאורה טבעית משופרת	5
22	חתך סכמתי במשרד עם חלון בכיוון דרום	5.1
23	הפתח העליון	5.2
24	הפתח התחתון	5.3
25	מדף אור-הצללה	5.4
26	פתרון עקרוני לפתחים בכיוון מזרח ומערב	5.5
26	פתרון עקרוני לפתחים בכיוון צפון	5.6
27	חלופות אדריכליות לתאורה טבעית	6
27	גודל החלון	6.1
28	סוג הזיגוג	6.2
28	העברת אור	▪
29	זיגוג 'חם': שימור אנרגיה בבניין	▪
29	זיגוג 'קריר': הפחתת רווחי חום דרך הזיגוג בבניין	▪
30	חלוקת פתחי הבניין לאזורי תפקוד שונים: האחד למבט והשני להכנסת אור טבעי	6.3
31	אפיון הפתח העליון	6.4
31	מיקום	▪
31	עומק	▪
31	צבע דופן חלון ומסגרת	▪
32	סוג זיגוג	▪
32	אמצעי הצללה וניתוב אור טבעי	▪



32	6.5	אפיון הפתח התחתון
32		▪ מיקום
33		▪ עומק הפתח
33		▪ צבע דופן הפתח ומסגרת החלון
33		▪ סוג זיגוג
33		▪ אמצעי הצללה
37	6.6	מדף אור-הצללה
37		▪ מדף אור חיצוני
38		▪ מדף אור פנימי
38		▪ תכנון מדפי האור
41	6.7	אמצעים נוספים לניתוב אור
42	6.8	מאפייני המשרד
42		▪ מספר כיווני אור
42		▪ תקרה
43		▪ צבע וגימור פנימי
43		▪ מחיצות וריהוט
43		▪ מסך המחשב
44		▪ מיקום עמדת העבודה
46	7.	שילוב תאורה טבעית וחשמלית להשגת חיסכון באנרגיה
46	7.1	מעגלי תאורה
47	7.2	ויסות עוצמת התאורה
47	7.3	חיישנים לבקרת התאורה המלאכותית
49	8.	התייחסות לדרישות סביבתיות אחרות
49	8.1	מבט אל הסביבה החיצונית
49	8.2	אזור טבעי
50	8.3	מתן הגנה אקוסטית
50	8.4	הפחתת עומס חום
51	8.5	חימום פסיבי
52	8.6	שמירה על פרטיות
54	9.	רשימת קריאה
54	9.1	ספרים נבחרים בעברית
54	9.2	ספרים נבחרים באנגלית
55	9.3	מדריכים באינטרנט
56	9.4	רשימת מקורות של תמונות וגרפיקה במסמך

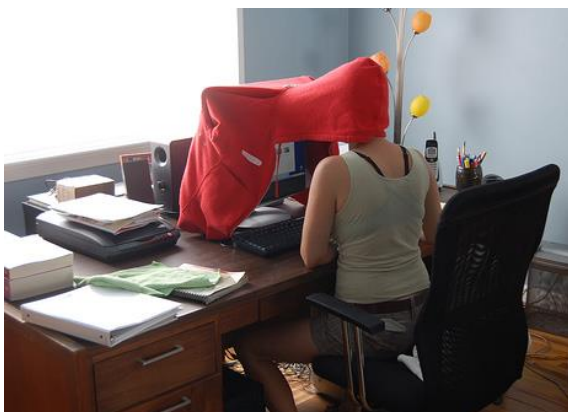




**כמעט כל החלונות בחזית הצפונית בבניין
משרדים זה חסומים על ידי צלונים פנימיים**

תכנון נכון של תאורה טבעית במשרדים הוא חיוני להשגת נוחות ויזואלית ושימור אנרגיה. לעומת זאת, תכנון שגוי יכול לגרום להפרעה ניכרת בעבודה, לירידה בשביעות רצון העובדים ולפגיעה בבריאותם. תכנון לקוי עלול להביא לכך שתידרש הפעלה מלאה של התאורה המלאכותית בכל שעות היממה, לרבות בימים בהירים, ובהתאם לכך יביא להגדלת צריכת האנרגיה בבניין. הידלדלות מקורות האנרגיה והפגיעה בסביבה במהלך הפקת חשמל ממקורות מתכלים, שהם המרכיב העיקרי בסל התשומות לאנרגיה בישראל, יצרו צורך דחוף בהפחת צריכת האנרגיה בבניינים (בכלל) ובבנייני משרדים בפרט. מערכות התאורה המלאכותית בבנייני משרדים צורכות בין רבע לשליש מכלל האנרגיה הנדרשת להפעלתם, כתלות בתנאי האקלים, וחיסכון בהפעלתם יתרום תרומה חשובה לחיסכון הכולל.

רבים מבנייני המשרדים המודרניים מאופיינים בשטחי זיגוג נרחבים במעטפת הבניין. בחירת זיגוג מתאים והתקנת מערכות הצללה אמנם מאפשרים הפחתה מסוימת בעומס החום, אך בדרך כלל אינו מונע כניסת קרינת שמש ישירה לחלל המשרדים במשך כל שעות העבודה. הבהק ועומסי החום אשר נגרמים בשל כך אינם מאפשרים נוחות ויזואלית ותרמית, ומקטינים את יעילות העבודה. לכן אנו מוצאים כי במשרדים רבים מערכות הצללה סגורות לאורך כל שעות היום והתאורה המלאכותית מופעלת באופן מלא. במצב עניינים זה, שטחי הזיגוג הנרחבים אינם משיגים את מטרותיהם העיקריות - קשר עם הסביבה החיצונית, הכנסת אור טבעי לחלל, ושימור אנרגיה על ידי הפחתת השימוש בתאורה מלאכותית.



כל האמצעים כשרים להשגת נוחות!

השימוש בתאורה טבעית במשרד משפר את יעילות העבודה ושביעות רצון העובדים ובריאותם. ניתן להסביר את ההשפעות הפסיכולוגיות החיוביות של האור הטבעי באיכויותיו הייחודיות: האור הטבעי מורכב מספקטרום מלא של קרינה באורכי גל שונים, ולכן מאפשר הבחנה טובה יותר במגוון צבעים רחב. מחקרים רבים מראים כי הדינאמיות של המאור הטבעי - הבאה לידי ביטוי בשינויים קלים בעוצמת ההארה, בספקטרום, ובהצללה - יוצרת אפקט פסיכולוגי מעורר. החשיפה לאור טבעי מאפשרת מעקב אחר השינויים המתחוללים בסביבה החיצונית בהתאם לשעה ביממה, לעונות השנה ולמזג האוויר. למאור הטבעי גם



השפעות פיזיולוגיות חיוביות על בריאות העובדים: קרינת השמש מאפשרת חיטוי, יבוש, ומניעת בקטריות בחלל, עידוד הטמעת ויטמינים ושמירה על תקינות המחזוריים הביולוגיים היומיים בגוף האדם.

נאמן (2002) מציין כי "אור השמש קשור בתודעתנו עם בהירות, שמחה, חמימות, ובריאות". התאורה הטבעית משפיעה על האווירה ותפיסת החלל במשרד. לדוגמא: עוצמת הארה גבוהה, דינאמית, ובעלת ספקטרום חם (כפי שמספקת קרינת השמש הישירה והמוחזרת) בדרך כלל משרה אוירה נעימה ורבת חיוניות, בעוד שעוצמת הארה נמוכה, מונוטונית, ובעלת ספקטרום קר (כפי שמספקת תאורת פלאורוצנט סטנדרטית) משרה אוירה דיכאונית-עייפה. שימוש מושכל בתאורה טבעית יכול גם לשמש להדגשת מאפיינים אדריכליים בבניין, למשל על ידי יצירה מכוונת של ניגודים בהארה בין חללים שונים ובין חלקי בניין שונים.

בכדי שהשימוש בתאורה טבעית במשרדים יאפשר שימור אנרגיה, על המתכנן להבטיח כי עוצמת התאורה הטבעית תהיה מספקת וכי לא ייווצר סינוור. בעוד שהשגת כמות אור מינימלית הינה לרוב משימה קלה (אותה ניתן להשיג על ידי הגדלת שטח הזיגוג, למשל), תכנון משרד עם עוצמת תאורה טבעית גבוהה מספיק, אחידה במידה נאותה וללא סינוור מהווה אתגר משמעותי. מניעת סינוור היא חיונית: חלל אשר בו עוצמת הארה מספקת אך מלווה בסינוור לא יאפשר תפקוד יעיל, ולפיכך סביר להניח שתידרש האפלה חלקית או מלאה של החלונות והפעלת תאורה מלכותית. הגורם העיקרי ליצירת סינוור הוא קרינת השמש הישירה, ולפיכך יש צורך בתכנון אלמנטים אשר ימנעו את חדירתה לסביבת העבודה.

רצוי כי תכנון עקרוני של התאורה הטבעית יעשה כבר בשלבי התכנון המוקדמים, בהם נקבעים רבים מן המאפיינים האדריכליים המשפיעים על כמות ואיכות התאורה הטבעית, כגון מיקום הבניין; מיקום ועומק המשרדים; וכן כיוון הפתחים, מיקומם וגודלם.

תהליך תכנון תאורה טבעית יכלול בדרך כלל את הפעולות הבאות:

- א. מיקום פתחים במעטפת הבניין אשר בעדם יחדור אור טבעי לחללים המיועדים לעבודה משרדית
- ב. תכנון אלמנטים לצמצום כניסת קרינת שמש ישירה לסביבת העבודה במשרדים
- ג. תכנון חללי הפנים להפחתת ניגודי בהיקות
- ד. תכנון מעגלי תאורה מלאכותית בהתאם לעוצמת ההארה הטבעית באזורים השונים
- ה. תכנון חישני אור ובקרת תאורה מלאכותית המגיבים לעוצמת ההארה הטבעית
- ו. מסירת הוראות הפעלה ותחזוקה

לצורך תכנון מדויק מומלץ לשלב בדיקות תפקוד והשוואת חלופות אדריכליות באמצעות תוכנות להדמיית תאורה טבעית.



2. תאורה טבעית משופרת להשגת נוחות וויזואלית

2.1 נוחות ויזואלית

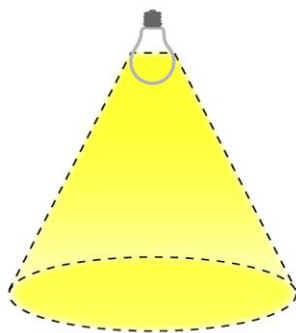
הגדרה:

"נוחות ויזואלית היא הלך הרוח המבטא שביעות רצון מהסביבה הנראית."

"Visual comfort is the state of mind that expresses satisfaction with the visual environment."

שני גורמים עיקריים משפיעים על הנוחות הויזואלית: כמות האור המגיעה לעין ומידת הניגוד הקיימת בין אזורים שונים בשדה הראייה. אנו זקוקים לכמות אור מספקת בכדי לאפשר לעין להבחין בפרטים קטנים ועדינים. מאידך, עוצמת הארה גבוהה מדי עלולה לגרום לאי-נוחות.

כמות האור המגיעה לעין תלויה במספר גורמים:

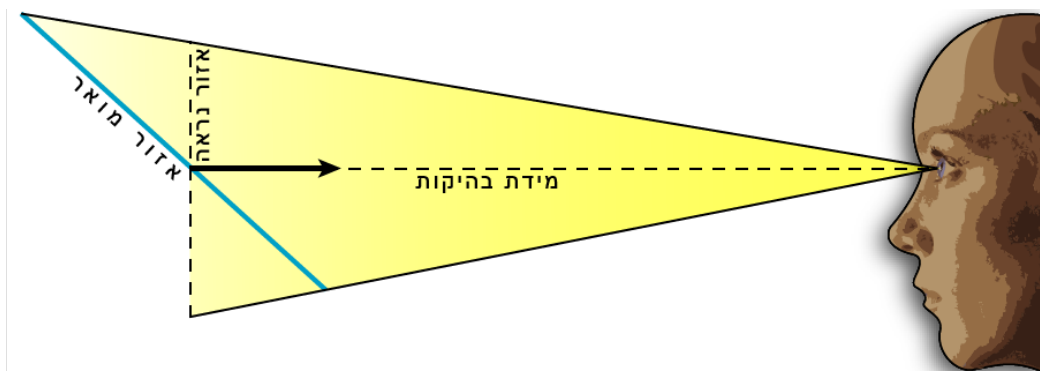


א. **עוצמת ההארה** (illuminance), שהיא כמות האור הפוגעת בעצם, ליחידת שטח. עוצמת ההארה נמדדת ביחידות של לוקס (lx), ואיננה תלויה בתכונות המשטח אלא בעוצמה של מקור האור, במרחק ממנו ובתכונות התווך שביניהם. עוצמת ההארה אינה תלויה בנקודת המבט של המתבונן.

ב. **בהיקות** (luminance), שהיא צפיפות שטף האור הנפלט ממקור אור או מוחזר ממשטח בוחק, ליחידת שטח. למעט במקרים שבהם מקור האור חשוף, הבהיקות תלויה לא רק בעוצמת ההארה אלא במידה רבה בתכונות האופטיות של פני השטח ובנקודת המבט של המתבונן. בהיקות נמדדת ביחידות של קנדלה/מ² (cd/m²).

ג. **הזווית המרחבית** הנמדדת מן העין של עצם או משטח בעל בהיקות מסוימת.

ד. **המרחק הזוויתי** בין השטח המואר בשדה הראייה לבין ציר הראייה של המתבונן.



שלא כמו עוצמת ההארה, הבהיקות של עצם או משטח תלויה בנקודת המבט של המתבונן



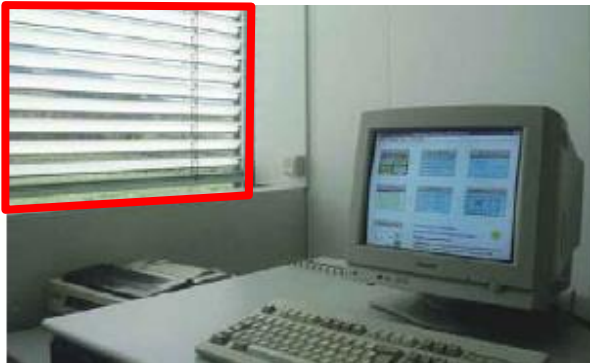
סינוור

כאשר כמות האור המגיעה לעין מספקת, אולם ניגודי הבהיקות בין אזורים שונים בשדה הראייה גדול מדי, עלול להיווצר סינוור.

הגדרה:

סינוור הינו-אי נוחות בראייה או פגיעה ביכולת להבחין בעצמים או פרטים הנוצר כתוצאה מטווח או פילוג לא מתאים של הבהיקות בשדה הראייה, או בשל הבדל ניגודיות קיצוניים.

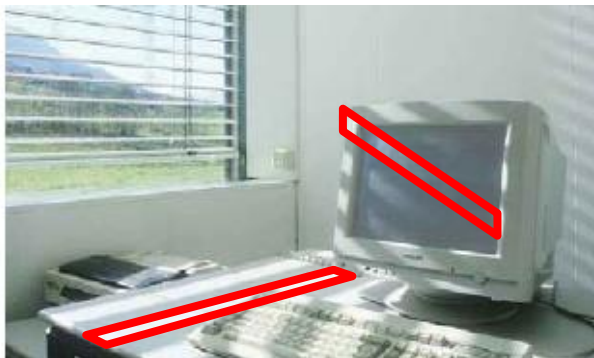
הועדה הבינלאומית למאור (CIE)



Error! Bookmark not

סינוור מבהיקות גבוהה של הרקע
defined.

"Glare is the condition of vision in which there is discomfort or a reduction in the ability to see details or objects, caused by an unsuitable distribution or range of luminance, or extreme contrasts."



סינוור מכניסת קרינת שמש ישירה^[1]

סינוור נוצר בדרך כלל כאשר קרני אור מגיעות לעין ממקור אור חשוף (כגון ממנורה או מהשמש), אך יכול להיווצר גם כתוצאה מהחזרה של קרני אור ממשטחים שונים. החזרי אור חזקים ממשטחים מבריקים יוצרים 'סינוור-מוחזר' (reflected glare). האור המוחזר עלול גם ליצור פגיעה ביכולת להבחין בפרטים על גבי המשטח ממנו חוזר האור. תופעה זאת נקראת 'החזרים ממסכים' (veiling reflections). סינוור יכול להיווצר גם בשל ניגודי בהיקות גבוהים בשדה הראייה (למשל כאשר חוזר אור רב מבעד לחלון הממוקם בקיר כהה).

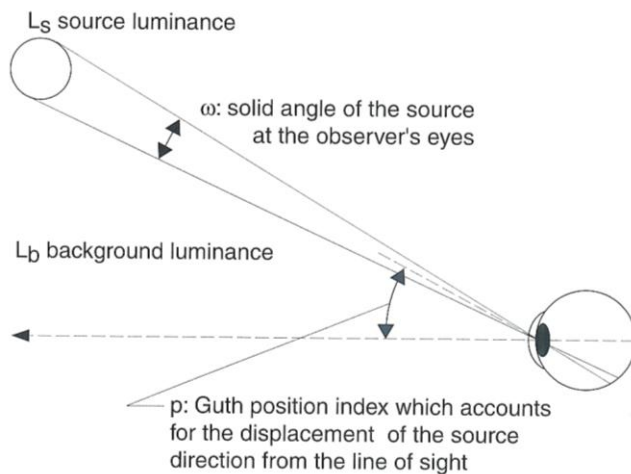
הסינוור יכול לגרום הפרעה תפקודית (ולפיכך יקרא 'סינוור ליקוי' - disability glare), או לגרום רק לאי-נוחות ויזואלית, בעוד אינו מפריע לתפקוד הראייתי (ולפיכך יקרא 'סינוור טורד' - discomfort glare).

ניתן להעריך באופן גס מאוד אם קיים סינוור על ידי בדיקה האם קרינת שמש ישירה מגיעה לעיניים, או על ידי בדיקת יחס הבהיקות בין השולחן, מסך המחשב והרקע לסביבת העבודה. הערכה מדויקת יותר ניתן לקבל באמצעות מדדים שונים הנקבעים בעזרת נוסחאות אשר בנויות בדרך כלל על פי המתכונת הכללית הבאה:



$$\frac{(L_s \text{ source luminance}) \times (L_b \text{ background luminance})}{(L_s \text{ source luminance}) \times (L_b \text{ background luminance})} = \text{תחושת הסינוור}$$

הגורמים m, n, x, y הם מקדמים אמפיריים אשר נקבעים בעזרת ניסויים מבוקרים במעבדות המחקר.



מנוסחה זאת ניתן ללמוד שההסתברות להיווצרות סינוור גדלה ככל שעוצמת האור גבוהה יותר, מקור הסינוור קרוב יותר למרכז שדה הראייה, מקור הסינוור תופס שטח נרחב יותר משדה הראייה והניגוד בין בהיקות המקור לבהיקות סביבתו גדול יותר.

[2] הגורמים המשפיעים על סינוור

במהלך השנים שוכללה נוסחה בסיסית זאת בהתאם לממצאים סטטיסטיים ממחקרים אשר בדקו את שביעות רצונם של הנבדקים בתנאי תאורה שונים. הממצאים קיבלו ביטוי במספר מדדים, אשר הבולטים ביניהם הינם:

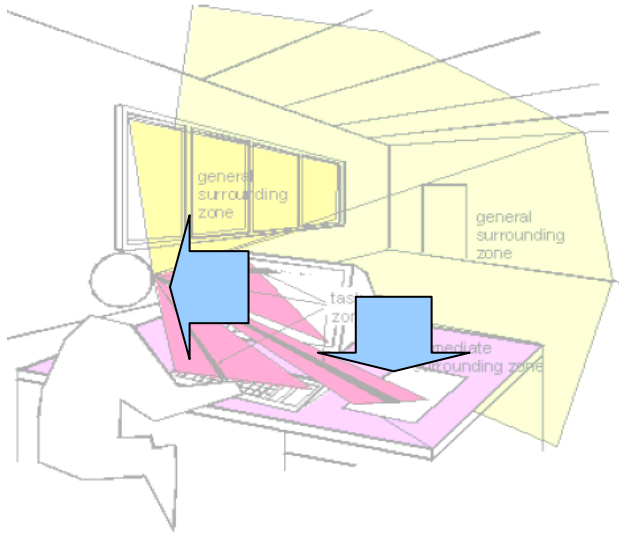
- ISO 8995 Universal Glare Rating (UGR), המשמש בתקן התאורה המלאכותית ISO 8995.
- Daylight Glare Index (DGI), מדד המיועד לסביבת עבודה עם תאורה טבעית.
- Daylight Glare Probability (DGP) הינו מדד אשר מאפשר להעריך את ההסתברות לסינוור בסביבת עבודה עם תאורה טבעית (אך לא להערכת מידת הסינוור).

ביצוע החישובים הנדרשים אינו פשוט, אולם לצורך הערכת המדדים ניתן להשתמש בתוכנות מחשב. השימוש בתוכנות דורש זמן ללימוד התוכנה וידע מקצועי בתחום התאורה אשר אינו תמיד מצוי בקרב האדריכלים, ולפיכך נראה שהערכת מדדי הסינוור יכולה להתבצע בעיקר על ידי יועצי תאורה.



2.2 עוצמת הארה טבעית במשרדים

עוצמת הארה טבעית על גבי משטח אופקי (שולחן עבודה)



נוחות ויזואלית מושפעת לא רק מעוצמת ההארה על משטח העבודה, אלא גם מכמות האור המגיעה לעיניים^[2]

עוצמת ההארה המינימלית המומלצת על גבי שולחן העבודה הינה 500 לוקס בסביבת עבודה משרדית סטנדרטית ו-750 לוקס בסביבת עבודה הדורשת הבחנה בפרטים (כגון שרטוט, קריאה וכתובה). הנחיות מפורטות לעוצמת ההארה הנדרשת בחללי עבודה מסוגים שונים ניתן למצוא בתקן ת"י 8995, תאורה למקומות עבודה שבתוך מבנים (אשר מאמץ את הנחיות התקן הבינלאומי ISO 8995).

במידה והתאורה הטבעית אינה מספקת את עוצמת ההארה המינימלית המומלצת יש צורך בהפעלת תאורה מלאכותית.

עוצמת ההארה המופיעה בתקנים השונים מתייחסת בדרך כלל לתאורה מינימלית

בלבד, מטעמים של חיסכון באנרגיה (בתאורה חשמלית) ולהפחתת העומס על מערכת מיזוג האוויר (בתאורה טבעית). עם זאת, העיניים מסוגלות להתרגל לעוצמות הארה גבוהות בהרבה, כל עוד אין סינוור. במחקר שנערך לאחרונה במכונים לחקר המדבר של אוניברסיטת בן גוריון ואשר כלל 60 משתתפים, נמצא כי שביעות רצון מרבית התקבלה בעוצמת הארה ממוצעת של 2400 לוקס. לפיכך ניתן להסיק כי במצבים מסוימים, בעיקר אם קרינת השמש רצויה על מנת להקטין את עומסי החימום בחורף, ניתן לאפשר עוצמת הארה גבוהה מהערכים הרשומים בתקן.

עוצמת הארה טבעית בסמוך לעיני העובד (אנכית)

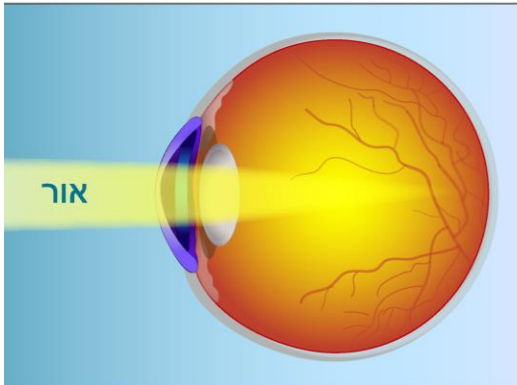
הארת משטח העבודה דרושה בכדי לאפשר את ביצוען של מטלות שונות, אולם אין קשר ישיר בין כמות האור המגיעה אל השולחן לבין עוצמת האור הפוגעת בעיני האדם היושב סמוך אליו. **אין אפוא די בכך שעוצמת ההארה על גבי השולחן תהיה מספקת: יש להבטיח כי כמות האור המגיעה לעיניים תהיה אף היא נאותה – בכדי להנות מההשפעה החיובית של אור השמש על הערנות, על מצב הרוח וכפועל יוצא מכך גם על פריון העבודה.** רצוי גם כי האור המגיע לעיניים יהיה טבעי: מחקרים מראים כי תאורה טבעית המגיעה לעיני העובד עדיפה על פני אור ממקורות מלאכותיים. רוב המנורות, ובמיוחד המנורות הפלאורוצנטיות הלבנות הנפוצות ברוב המשרדים, אינן תורמת לעירנות ולפעילות הורמונאלית של גוף האדם כפי שעושה אור השמש.

כפי שקשה להבטיח עוצמת הארה מסוימת על גבי משטח העבודה בתנאים של תאורה טבעית משתנה, כך קשה גם להבטיח כמות אור קבועה סמוך לעיני העובד. אף על פי כן, רצוי שעוצמת ההארה הטבעית המגיעה לעיניים (הנמדדת במישור אנכי) תהיה כ-1000 לוקס לפחות בחלק משעות היום. אם עוצמת ההארה תהיה גבוהה יותר במידה משמעותית – למשל 3000 לוקס - צפוי כי חלק מהעובדים יחוו סינוור. גם אם לא ידווחו על סינוור. לעומת זאת, עוצמת הארה נמוכה יותר לא תבטיח את מיצוי היתרונות הפיסיולוגיים של האור הטבעי.



2.3 המלצות למניעת סינוור במשרדים

צמצום הסינוור ע"י מניעת קרינת שמש ישירה בעינים

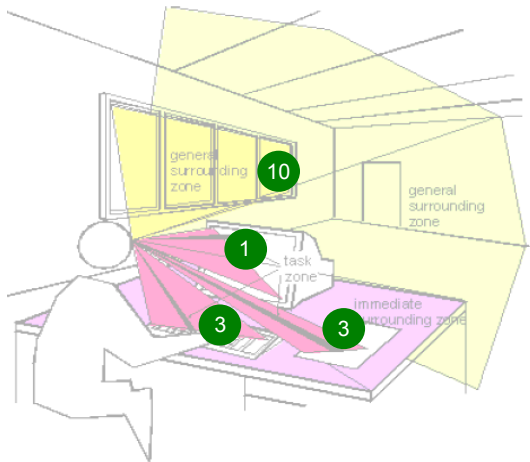


קרינת שמש החודרת ישירות לעין עלולה לגרום לסינוור

קרינת שמש ישירה המגיע לעיני העובד תיצור סינוור (כמעט ללא יוצא מהכלל), ולפיכך יש לתכנן אמצעים אשר ימנעו הגעה של קרינת שמש ישירה לעיני העובד. כאשר קרינת שמש ישירה פוגעת בעין נוצר פיזור מסוים על גבי הרשתית סמוך להיטל השמש, וכתוצאה מכך מופיעה הילה (עננה של אור) באזורים אלו אשר מפריעה להבחין בפרטים. כמו כן, כאשר קרינת השמש הישירה גורמת לעוצמת ההארה גבוהה, האישונים מצטמצמים ומקשים על הבחנה בפרטים בשדה הראיה אשר הינם בעלי בהיקות נמוכה בהשוואה לרקע.

צמצום הסינוור ע"י צמצום ניגודי בהיקות

בעוד הגעה של קרינת שמש ישירה לעיני העובד יוצרת סינוור ואינה מאפשרת עבודה נוחה, גם פגיעה של קרינת שמש ישירה בשולחן העבודה או בעצמים אחרים בשדה הראייה של העובד יוצרת ניגודי בהיקות ולפיכך עלולה להביא לסינוור.



חלון חשוף לשמיים, דף נייר לבן או אפילו מסך המחשב עלולים לגרום לסינוור כתוצאה מבוהק רב^[2]

בהיקות גבוהה נוצרת כאשר מקורות אור כגון השמש והרקיע נצפים ישירות דרך החלון, כאשר תאורה מלאכותית (במיוחד נורות חשופות) נמצאת בשדה הראייה, וכאשר אור רב מוחזר מעצמים שונים (במיוחד כאשר קרינת שמש ישירה פוגעת בעצמים בהירים ובעלי רפלקטיביות גבוהה).

ניגודי בהיקות בשדה הראייה יוצרים הפרעה בנוחות ופגיעה בכושר הראייה בשל הקושי של העין להתאים את גודל האישונים לעוצמת הארה אשר אליה היא חשופה. לכן מומלץ כי היחס בין הבהיקות של האזור בו מתמקדת העין, הסביבה הקרובה והרקע יהיה בערך 1:3:10. למרות שיחס זה מופיע כהמלצה במספר מדריכי תאורה, חשוב להביא בחשבון שהוא נקבע עבור סביבה המוארת בתאורה מלאכותית, ולפיכך אינו משקף יחס מציאותי

לסביבת עבודה המוארת בתאורה טבעית. בסביבת עבודה המוארת באור יום ניגודי הבהיקות בין המוקד לרקע עשויים להגיע ליחס של 1:20 מבלי לגרום לאי-נוחות.

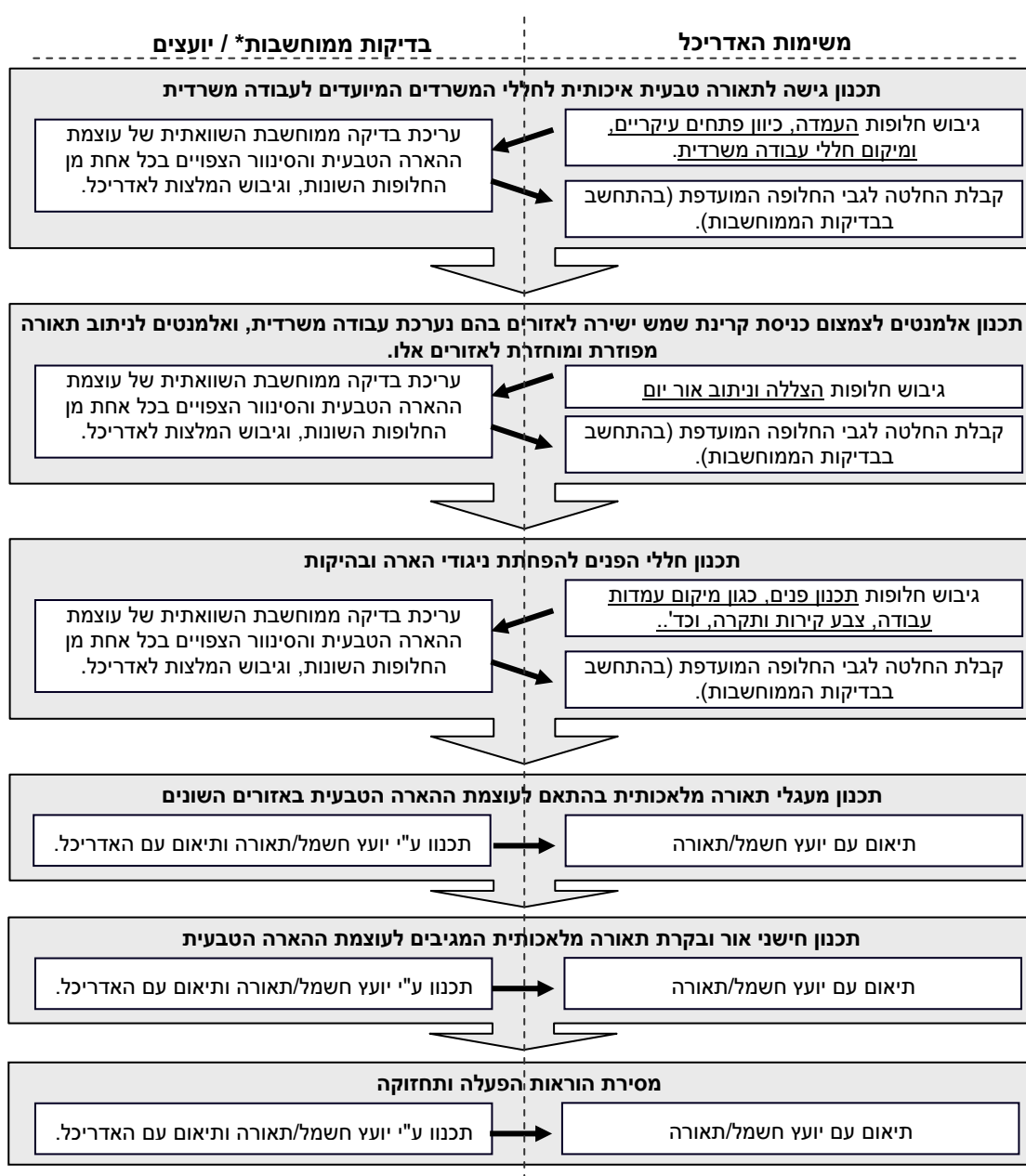
ניגודי בהיקות בשדה הראייה אמנם קשורים קשר הדוק להיווצרות סינוור, אולם סינוור מושפע גם מפרמטרים נוספים. לכן לא ניתן לקבוע כי ניגודי בהיקות יביאו בהכרח לסינוור, וגם לא עד כמה חמור הוא יהיה בסביבה מסוימת.



3. שילוב תכנון תאורה טבעית בתהליך התכנון האדריכלי

החלטות משמעותיות המשפיעות על איכות התאורה הטבעית בבניין בדרך כלל מתקבלות בתחילת תהליך התכנון האדריכלי. בשלב זה נקבעים גודלם של החללים ומידת החשיפה שלהם לאור השמש, ובהתאם לכך גם אופי התאורה הטבעית אשר תתקבל בהם. לפיכך מומלץ כי עוד בשלבים המוקדמים של התכנון ישולב בצוות התכנון אדריכל או מהנדס המומחה לתכנון תאורה טבעית. מומלץ גם לבחון את החלופות האדריכליות כבר בשלב הראשוני באופן השוואתי באמצעות הדמיות תאורה טבעית ממוחשבות, בהתייחס לאיכות המאור הטבעי ולחיסכון בחשמל הצפוי בהתאם למאפייני התכנון המוצע.

3.1 תהליך עקרוני לתכנון תאורה טבעית

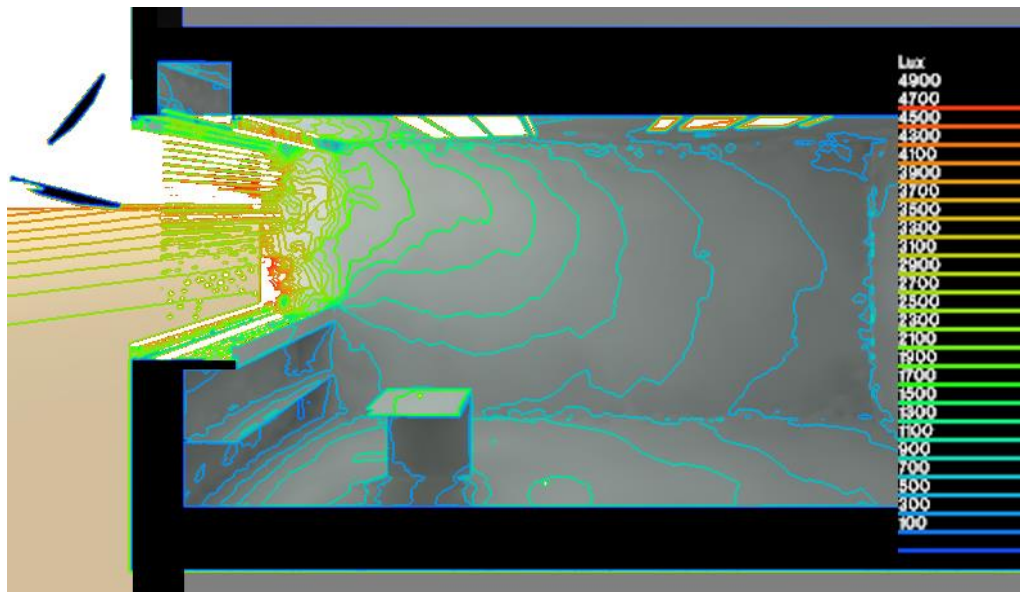


* בדיקות ממוחשבות יכולות להתבצע ע"י אדריכל אם הידע והכלים נמצאים ברשותו, או בעזרת יועצים חיצוניים.

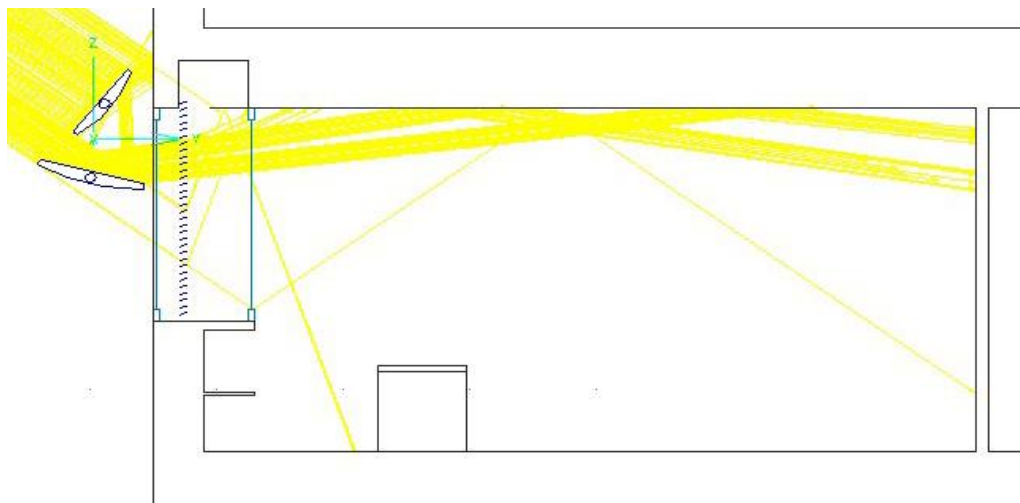


תכנון תאורה טבעית באמצעות הדמיות תאורה טבעית

פתרונות סכמתיים לתאורה טבעית עשויים לשפר את התאורה הטבעית במשרד ולהביא לשימור אנרגיה, אולם אינם יכולים להבטיח תפקוד אופטימלי משום שאיכות התאורה הטבעית מושפעת ממערכת מורכבת של מאפיינים אדריכליים ותנאי סביבה, וכן מאופן הפעלת מערכות ההצללה. איכות התאורה הטבעית במשרד עשויה להיות שונה בהתאם לכיוון החזית או אפילו כתוצאה מהצללה מבניינים שכנים, אף אם נעשה שימוש בפתרון אדריכלי זהה בשני המקרים. השימוש בהדמיות תאורה טבעית ממוחשבות מאפשר בחינה מפורטת של תנאי ההארה בהתאם לנתונים הספציפיים בכל משרד. הדמיות תאורה טבעית מאפשרות השוואת תפקוד חלופות אדריכליות שונות עוד בשלבי התכנון הראשוניים. כלים אלו מאפשרים גם בחינת פתרונות ייחודיים וחדשניים, אולם השימוש בתוכנות דורש ידע מקצועי וזמן ללימוד התוכנה.

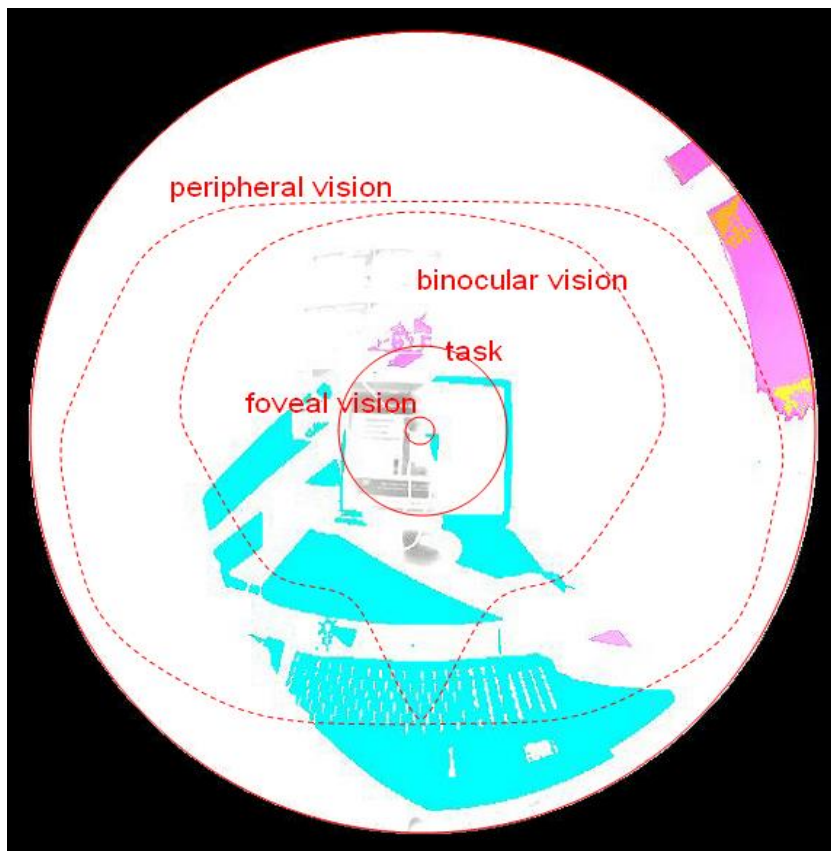
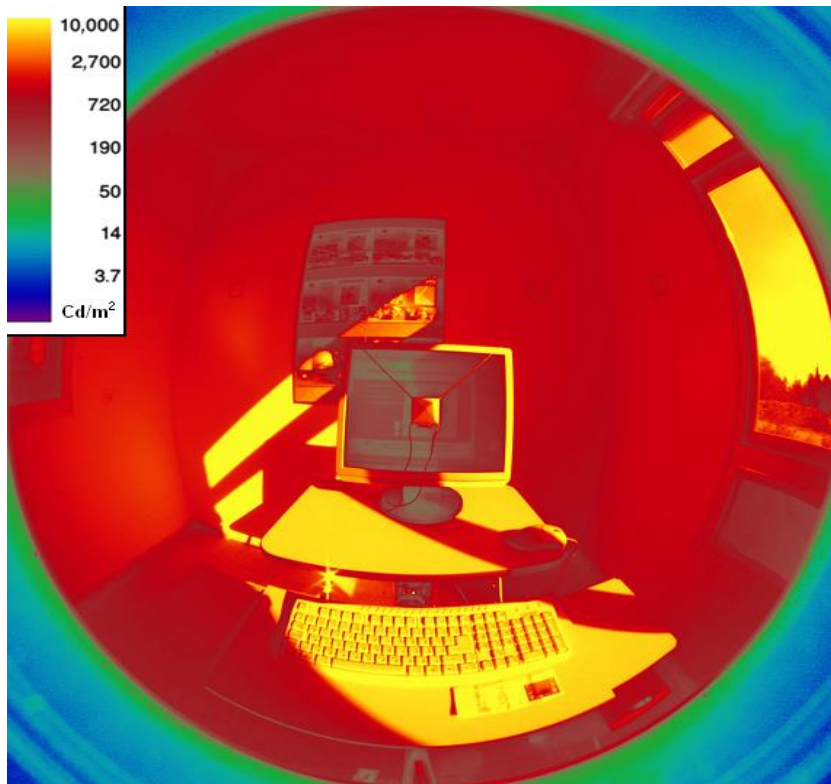


דוגמה להדמיית עוצמת הארה טבעית בחלל פשוט



דוגמה להדמיית הטייה של קרינת שמש ישירה באמצעות מדף אור חיצוני (כפול)





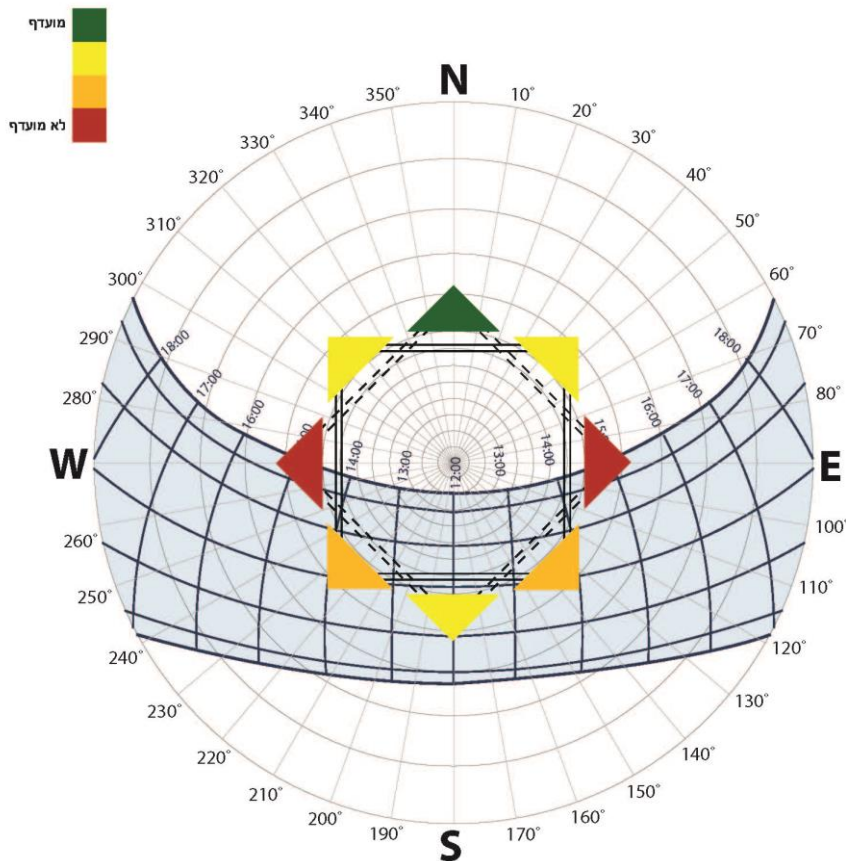
דוגמא לכיתוח תנאי תאורה בעמדת עבודה עם תאורת טבעית: בהיקות העצמים בשדה הראייה (למעלה) וניתוח המראה את גורמי הסינוור האפשריים (למטה)



4. תכנון ראשוני לתאורה טבעית משופרת

4.1 כיווני הפתחים

על מנת להשיג תאורה טבעית משופרת בעלות הנמוכה ביותר יש להחליט על העמדת הבניין במגרש ועל מיקום אזור המשרדים (בהתאם לכיווני השמים השונים) כבר בשלבי התכנון הראשוניים. בישראל, ההפניה המומלצת מבחינת תאורה טבעית תביא לכך שמרבית המשרדים יפנו לכיוון צפון. מבחינה תרמית הפניית המשרדים לכיוון דרום הינה האופטימלית באזורים הקרים בארץ (בשל הפוטנציאל להגדלת החימום הפסיבי בחורף); אולם בכיוון זה יש צורך בהצללה פנימית למניעת סינוור מכניסת קרינת שמש ישירה בימי החורף.



ניתוח מסלול השמש מראה כי הכיוון המועדף לפתחים (בקירות אנכיים), ובהתייחס לתאורה טבעית בלבד – הוא כיוון צפון. הכיוונים הפחות מתאימים הם מזרח ומערב.

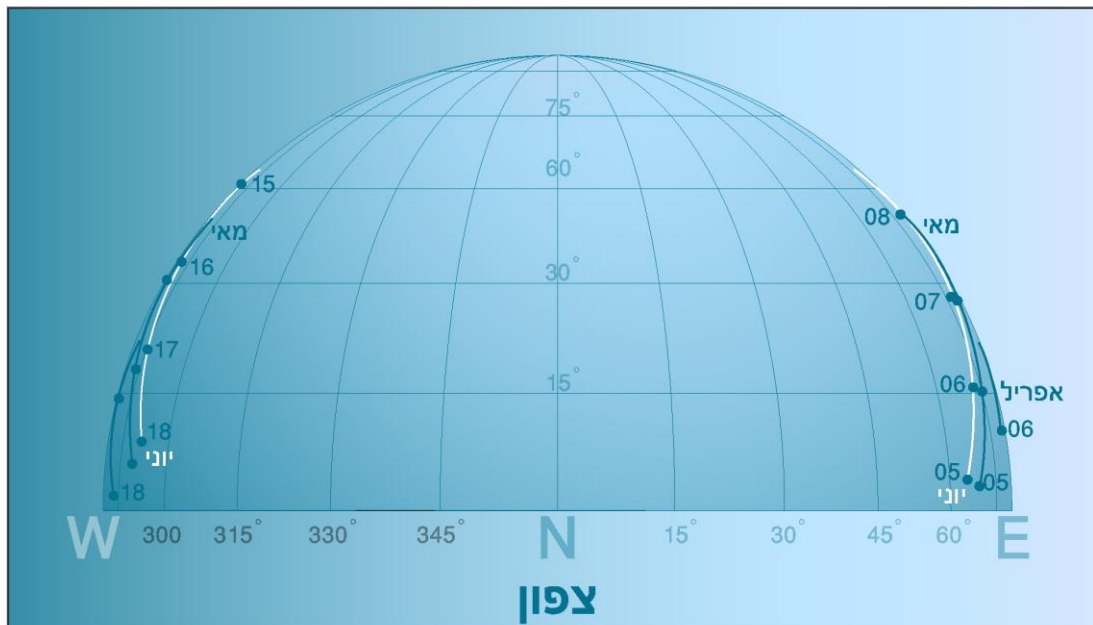


השפעת כיווני הפתחים בישראל על איכות המאור הטבעי

צפון

משרדים בכיוון צפון חשופים בעיקר לתאורה טבעית מקרינת שמש מפוזרת המגיעה מהרקיע. התאורה המפוזרת בדרך כלל אינה יוצרת ניגודי בהיקות גבוהים בחלל הבניין, ובמידה ועמדות העבודה אינן פונות כלפי החלון בהיקות הרקיע אף אינה גורת לסינוור (ראו גם פרק 6). מכיוון שהזריחה והשקיעה ביום הארוך ביותר בשנה, יוני 21, מתרחשות (במרכז הארץ) כ- 28 מעלות צפונה לציר מזרח-מערב, קרינת שמש ישירה מגיעה גם לחזית הצפונית בשעות הסמוכות לזריחה ולשקיעה. במידה והפעילות במשרד מתקיימת גם בשעות אלו ישנו צורך בהגנה מכניסת קרינת שמש ישירה לשם מניעת סינוור. ההגנה יכולה להיעשות על ידי מדפי הצללה אנכיים בחזית הבניין, רפפות, או וילונות הצללה פנימיים.

העובדה שבמרבית שעות היממה האור בחזית הצפונית הינו אור מפוזר מקטינה את ההסתברות לסינוור. עם זאת, דוקא מאפיין זה של האור הטבעי מקטין את היעילות של אמצעי ניתוב אור (כגון מדף אור) בחזית זו, ולפיכך האפשרות לספק הארה טבעית בעוצמה נאותה לעומק המשרד מוגבלת.

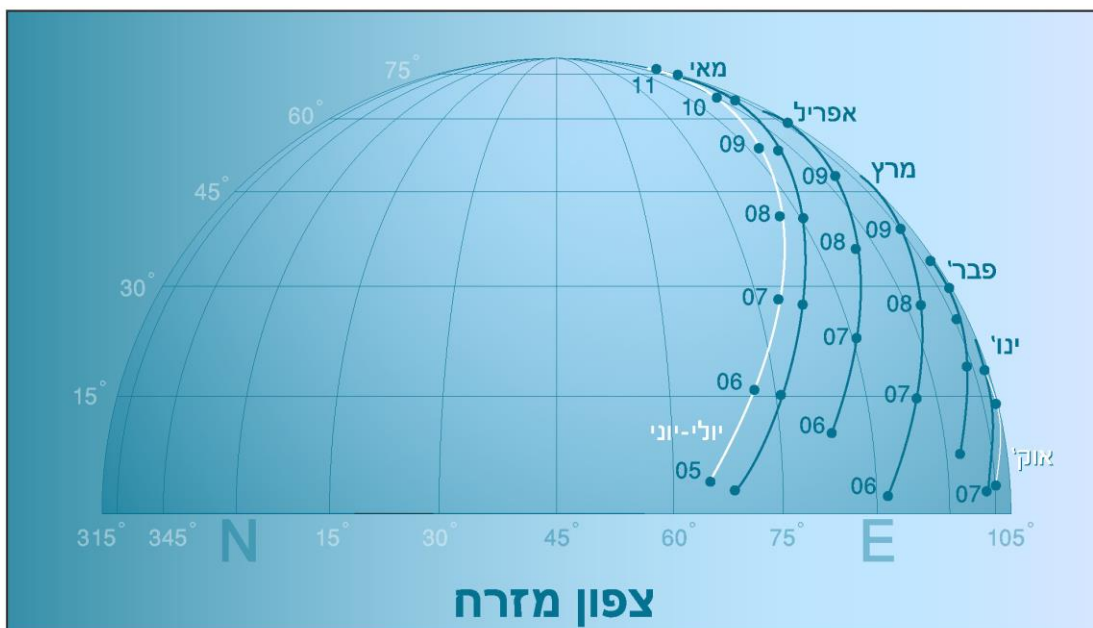
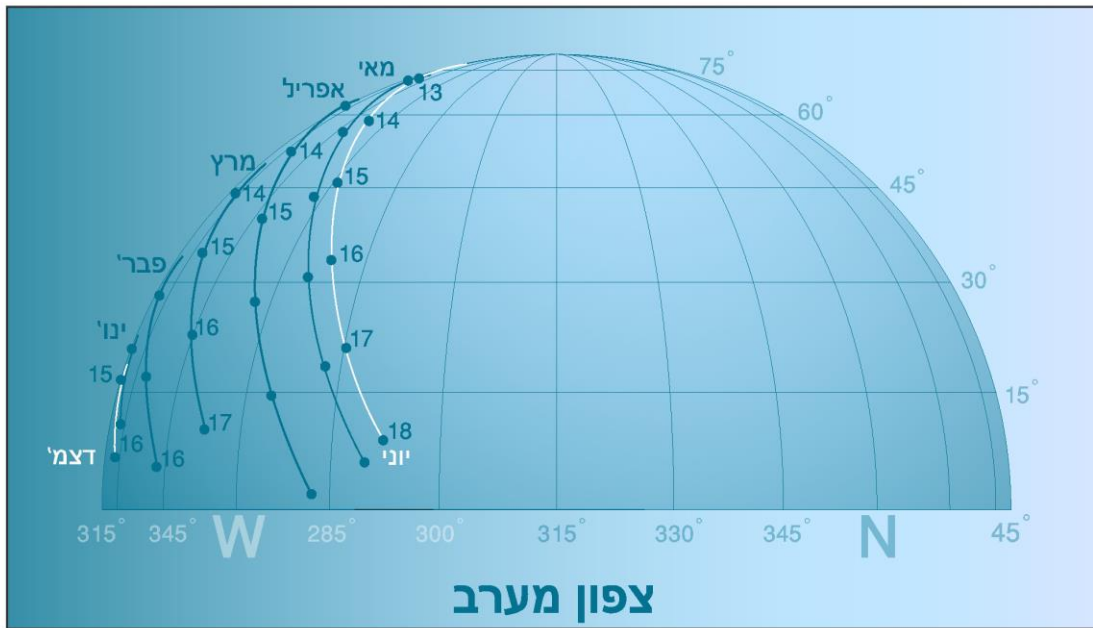


מסלול השמש הנראה מבעד לחלון בחזית הצפונית, בהתאם לעונות השנה ולשעות היממה



צפון-מערב וצפון-מזרח

משרדים בכיוון צפון-מערב וצפון-מזרח חשופים לקרינת שמש ישירה בקיץ ובעונות המעבר במשך שעות רבות יותר מאשר משרדים הפונים לצפון. בעונת החורף חדירת קרינת שמש ישירה מבעד לחלונות בכיוון זה פחותה מזאת החודרת בעד חלונות הפונים לכיוונים מערב, מזרח, ודרום. בכיוונים אלו מדפי הצללה אנכיים יאפשרו הפחתת עומס החום בעונה החמה, אולם לא ימנעו סינוור מכניסת קרינת שמש ישירה; לכן מומלץ להתקין בחלונות גם רפפות הצללה או וילונות. כיוונים אלו עדיפים על הכיוונים מזרח ומערב בעיקר בשל עומס החום המופחת המגיע אליהם בקיץ.

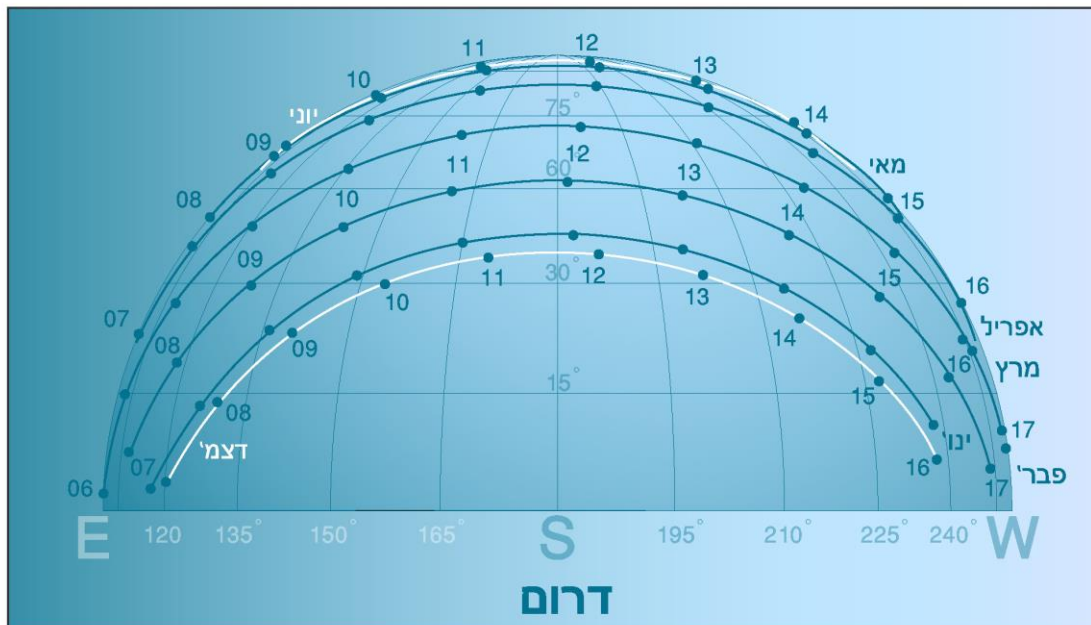


מסלול השמש, כפי שהוא נראה מבעד לחלון בחזית הצפון-מערבית (למעלה) ובחזית הצפון-מזרחית (למטה), בהתאם לעונות השנה ולשעות היממה



דרום

משרדים הפונים לכיוון דרום חשופים פחות לכניסת קרינת שמש ישירה לעומק המשרד מאשר משרדים הפונים לכיוונים מזרח או מערב, ולפיכך ההסתברות בהם לסינוור, גם אם לא מתוכננים בהם אמצעי הצללה, קטנה יותר. בעונה החמה, כאשר קרינת השמש הישירה מגיעה מזוויות גבוהות ביחס לאופק, ניתן להגן על חלונות דרומיים ביתר קלות ובאמצעי הצללה מצומצמים בהשוואה לאלו הדרושים בכיוונים מזרח ומערב. אולם בימי החורף, כאשר קרינת השמש הישירה מגיעה בזוויות נמוכות, יש צורך בהצללה משמעותית לצורך מניעת סינוור גם בחזית זאת. העדיפות למיקום משרדים בחזית הדרומית (בהשוואה לכיוונים מזרח או מערב) נובעת בראש ובראשונה מסיבות תרמיות, לצורך הפחתת עומס החום. החזית הדרומית עדיפה עליהן בעיקר אם לא מתוכננים אמצעי הצללה כלל. עם זאת, חשוב לציין גם כי בחזית הדרומית יהיה השימוש במדף אור להחדרת אור טבעי לעומק החלל בימי החורף יעיל יותר מאשר בכל שאר החזיתות של הבניין.

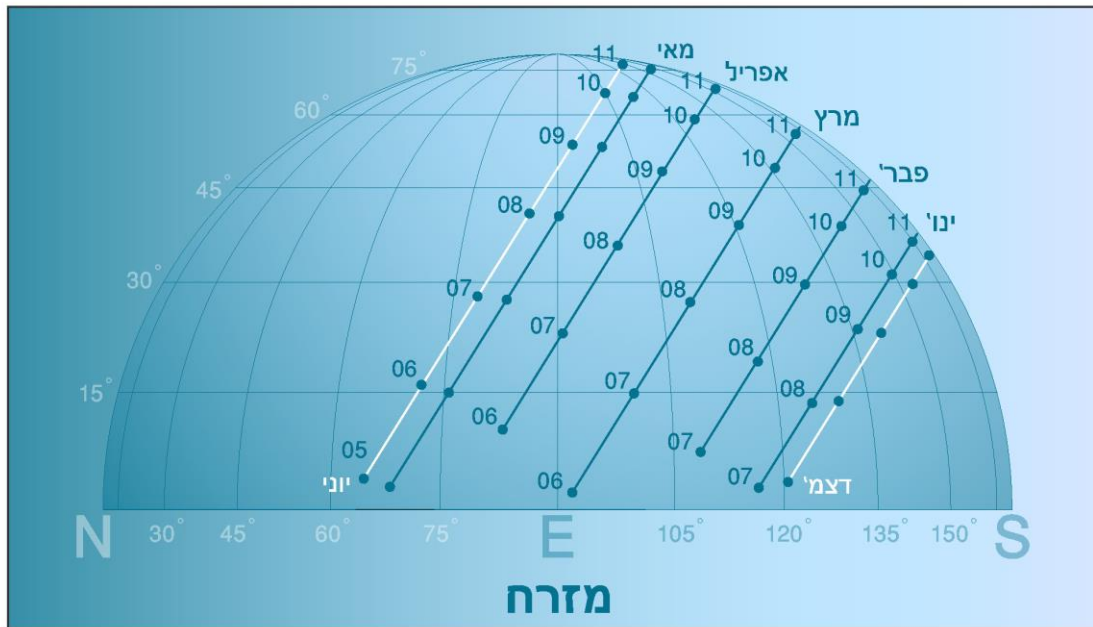


מסלול השמש כפי שהוא נראה מבעד לחלון בחזית הדרומית בהתאם לעונות השנה ולשעות היממה



מזרח ומערב

משרדים בכיוון מזרח ומערב חשופים לכניסת קרינת שמש ישירה לעומק המשרד בכל ימות השנה: במזרח בשעות הבוקר, ובמערב בשעות אחר הצהריים. לפיכך במשרדים בכיוונים אלו ישנה הסתברות גבוהה לסינוור בחלק ניכר משעות העבודה. כיוונים אלו בעייתיים ביותר גם בשל עומס החום המרבי המגיע אליהם בעונה החמה. על מנת להגיע לנוחות ויזואלית כאשר החלונות פונים לכיוונים אלו, דרושים אמצעי הצללה מורכבים אשר בהכרח חוסמים חלק ניכר מהמבט כלפי חוץ. דוגמא לפיתרון הצללה של חלון מערבי מובאת בפרק 5.5.



מסלול השמש כפי שהוא נראה מבעד לחלון בחזית המזרחית (למעלה) והמערבית (למטה), בהתאם לעונות השנה ולשעות היממה



דרום-מזרח ודרום-מערב

בדומה לכיוונים מזרח ומערב, כיוונים משניים אלו חשופים לכניסת קרינת שמש ישירה לעומק המשרד בכל ימות השנה, ולפיכך חשופים גם לסינוור.

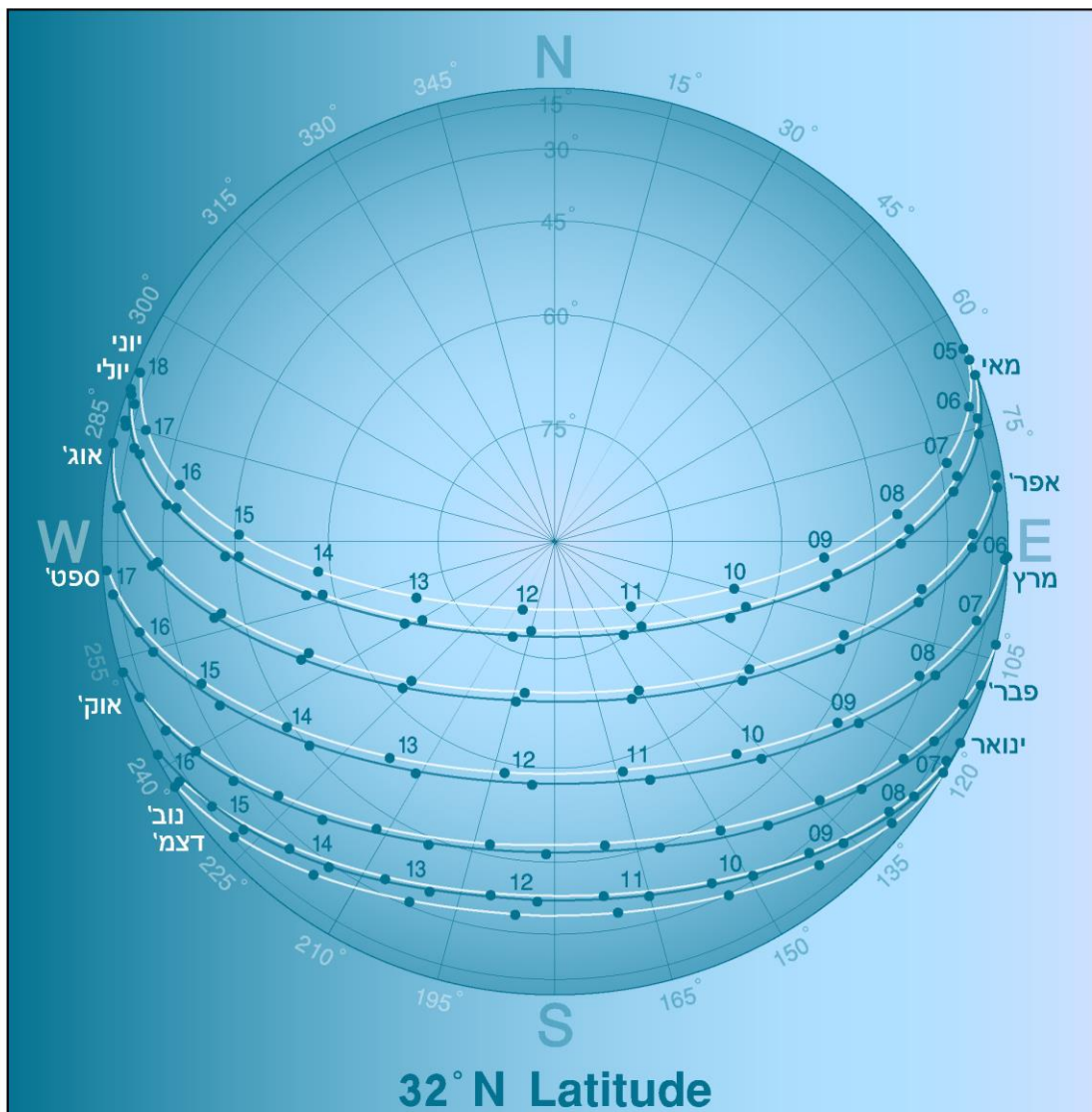


מסלול השמש כפי שהוא נראה מבעד לחלון בחזית הדרום-מערבית (למעלה) והדרום מזרחית (למטה), בהתאם לעונות השנה ולשעות היממה



פתחי תאורה בתקרה

פתחים בתקרה, כגון כיפות תאורה או חלונות עליונים, אפשריים בקומות משרדים עליונות. מכיוון שבישראל השמש נמצאת בשמיים בזוויות גבוהות במשך חלק ניכר מן השנה, עומס החום הנוצר עקב קרינת שמש ישירה דרך פתחים אלה עלול להיות גדול מאוד. לכן מומלץ כי פתחים בגג יהיו מצומצמים בשטחם ומתוכננים כך שתהיה בהם הפחתה משמעותית של קרינת השמש הישירה החודרת מבעדם, והעברת תאורה טבעית מפוזרת בלבד. חשוב לזכור כי פתחים בגג אינם חייבים לפנות לזניט (כלפי האנך): ניתן לשלב פתחים אנכיים (או משופעים) הפונים לאחד מכיווני השמיים באמצעות חלל מוגבה. אופי התאורה הטבעית במקרים אלו יהיה בהתאם לפנות הפתחים. האפשרות לפתוח פתחים בכיוון הזניט אינה שכיחה בישראל מכיוון שבנייני המשרדים בארץ הם בדרך כלל גבוהים וכוללים מערכות מיזוג על הגג. לפיכך מדריך זה אינו מפרט פתרונות לפתחים בכיוון זה.



היטל אופקי של מסלול השמש, בהתאם לעונות השנה ולשעות היממה



פתחים הפונים כלפי חצר פנימית (אטריום)

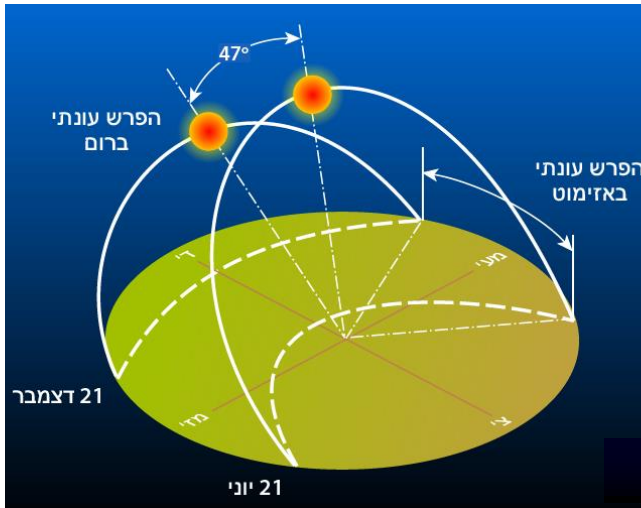
פתחים הפונים כלפי אטריום מאפשרים להכניס תאורה טבעית לעומק הבניין, ובכך לאפשר לחללי משרדים בעומק הבניין להנות מתאורה טבעית גם ללא חלון בחזית החיצונית. עוצמת ההארה הטבעית בעומק האטריום תהייה נמוכה בהרבה מזאת המגיעה לחזיתות הבניין: חלק ניכר מקרינת השמש הישירה נחסם על ידי הבניין עצמו, בעוד ששטף הקרינה המפוזרת קטן בשל צמצום שטח הרקיע הנראה בעומק האטריום. עם זאת, בקומות העליונות של הבניין עוצמת התאורה הטבעית, כמו גם מספר השעות בהן ישנה חשיפה לשמש ישירה, עשויה להיות דומה לזאת המתקבלת בחזיתות החיצוניות בכיוונים המקבילים. עוצמת ההארה הטבעית בעומק האטריום תלויה בגיאומטריה של חלל זה, ברפלקטיביות של החזיתות הפנימיות, באופי הזיגוג ובמאפייני ההצללה של חלל זה.

4.2 מיקום גיאוגרפי ותנאי אקלים

עוצמת ההארה הטבעית ואיכותה מושפעים מהמיקום על פני כדור הארץ ומתנאי האקלים במקום. מכיוון שמסלול השמש ברקיע משתנה בהתאם לקו הרוחב הגיאוגרפי, דפוסי הכניסה של קרינת השמש הישירה דרך הפתחים בכיוונים השונים משתנה בהתאם. לפיכך ניתוח ההשפעה של כיווני הפתחים על

איכות המאור הטבעי אשר תוארה במדריך זה מתאים רק לישראל ומדינות בקו רוחב דומה (32 צפון, בקירוב). התנאים באזורים אחרים, במיוחד במדינות אירופה אשר בהם התבצעו רבים מן המחקרים בנושא התאורה הטבעית, שונים באופן מהותי.

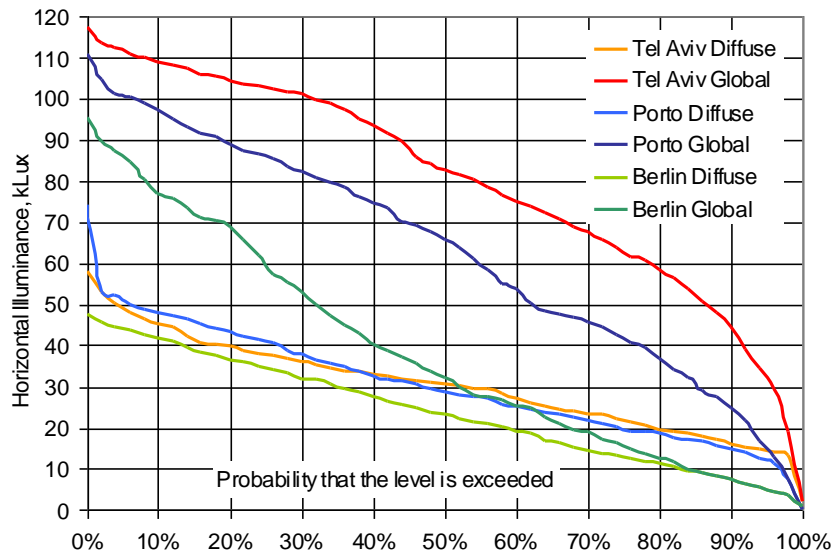
ההבדלים בקו הרוחב הגיאוגרפי בין דרום הארץ (אילת, 29.55 צפון) לבין צפונה (קרית שמונה, 33.22 צפון), אינם מתבטאים בהבדלים מהותיים במסלול השמש בהתאם לשעות היממה או עונות השנה. עם זאת, ניתן להציג את המסלול המדויק באמצעות כלי מחשב המשולבים ברוב התוכנות לתכנון אדריכלי, ולבצע הדמייה של התאורה הטבעית בהתאם.



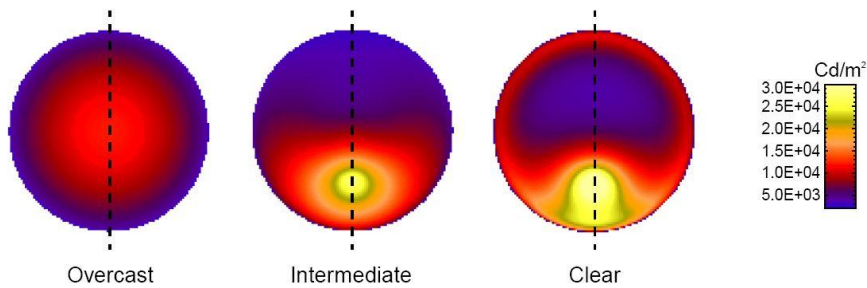
ההבדלים במסלול השמש בין אזורים שונים בארץ הינם בעלי השפעה זניחה על התאורה הטבעית

למרות האמור לעיל, ההבדלים בתנאי האקלים, הנוצרים בשל גורמים כמו מרחק מן הים או גובה טופוגרפי, משפיעים על קרינת השמש הנמדדת סמוך לפני הקרקע. ההבדלים הם משמעותיים בעיקר בעונת החורף. עם זאת, בהשוואה למרבית האזורים האחרים בעולם, כמות העננות בישראל נמוכה. לפיכך במרבית ימות השנה ישנם שמים בהירים עם קרינת שמש ישירה – כלומר קרינה המאופיינת לא רק בעוצמה גבוהה אלא גם בכיוון מוגדר. זאת בניגוד למדינות אחרות בהן האור המתקבל מן השמיים המעוננים הוא מפוזר (כלומר ללא כיוון מוגדר) ובעל עוצמה נמוכה יותר. לפיכך על המתכננים להיזהר מאימוץ הנחיות לתכנון תאורה טבעית ממדריכים זרים, ללא מתן תשומת לב לצורך המקומי במניעת סינוור.





ההתפלגות השנתית של עוצמת ההארה בצהריים על משטח אופקי בשלוש ערים: תל אביב, פורטו וברלין. הקרינה המפוזרת בשלוש הערים דומה, והשוני בעוצמת התאורה הכוללת נובע מהבדלים בשכיחות של קרינה ישירה חזקה חזקה. [3]

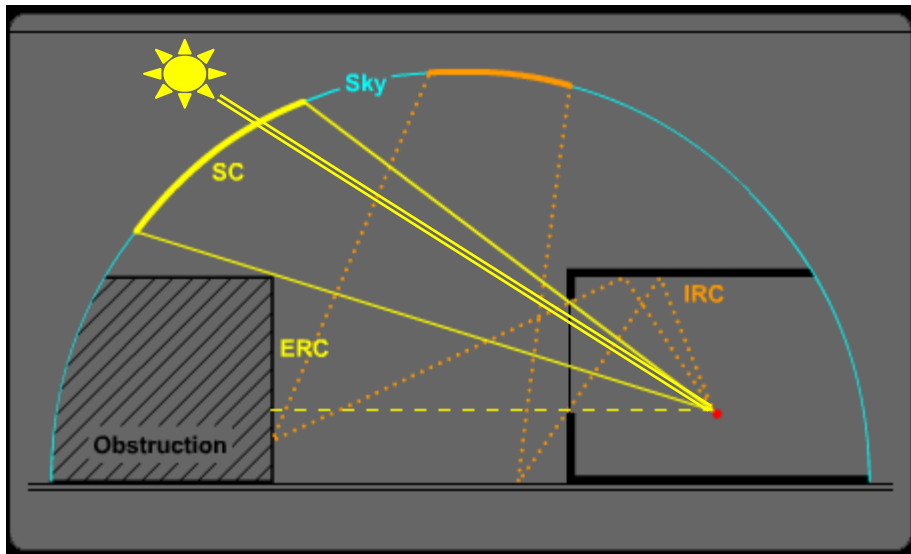


כאשר השמיים בהירים וללא עננים, עוצמת ההארה הנמדדת קרוב לשמש גבוהה במספר סדרי גודל יותר מאשר בשאר חלקי הרקיע. [4]



4.3 הסביבה הקרובה

עוצמת ההארה הטבעית ואיכותה מושפעים גם מאופי הסביבה הקרובה אל הבניין, ולכן על התכנון להתחשב במאפייניה (העכשוויים וכן העתידיים). הצללה מבניינים סמוכים או צמחיה עלולה להקטין את כמות האור הטבעי המגיעה לפתחי הבניין ולפגוע משמעותית ביעילות האמצעים לניתוב אור, גם אם עדיין תתאפשר כניסת אור טבעי מפוזר מהרקיע ואור מוחזר מהקרקע. פני הקרקע, בניינים סמוכים, ומרכיבי פיתוח הנוף עשויים להיות בעלי השפעה רבה על התאורה הטבעית. סביבה בעלת צבע בהיר תחזיר חלק ניכר מן האור המגיע מהשמש ומהרקיע, אם כי סביבה בהירה ורפלקטיבית במיוחד (כגון בריכת מים או זיגוג סלקטיבי) עלולים לגרום להחזרי אור בוהקים אשר יגדילו את ההסתברות לסינוור. בכדי לאפשר תאורה טבעית איכותית במשרדים על המתכנן להתייחס הן לפוטנציאל האור הטבעי והן ל'מפגעי אור' בסביבה הקיימת או העתידית.



אל כל נקודה בחלל החדר עשוי להגיע אור שמש מאחד או יותר מהמקורות הבאים: א. קרינת שמש ישירה; ב. קרינה מכיפת הרקיע (SC); ג. קרינה מוחזרת מעצמים הנמצאים מחוץ לבניין (ERC); ד. קרינה מוחזרת ממשטחים בתוך הבניין (IRC).^[5]

4.4 מיקום חללי העבודה

מומלץ כי כבר בשלבי התכנון הראשונים יקבע מיקום אזורי העבודה העיקריים סמוך לחלונות הבניין, בכדי שהעובדים יוכלו להנות מגישה לתאורה טבעית, למבט החוצה ולאוויר טבעי. הרצון למקם את מרבית חללי העבודה סמוך לפתחים ישפיע על תכנון הבניין כולו: על הפרופורציות שלו, על צורת העמדתו באתר ועל מיקום הפתחים. לכן מומלץ כי סכמות של הארגון הפנימי יבדקו כבר בשלבי התכנון הראשונים, כל עוד ישנה גמישות מסוימת בקביעת הפרמטרים האלו. למרות שכל חללי המשרד עשויים להנות מאור טבעי, מקובל כי אזורי השירות (כגון מעליות או מחסנים) אשר אין בהם שהות ארוכה יכולים להיות ממוקמים בעומק החלל, ובכך לאפשר לחללי העבודה להיות ממוקמים סמוך לפתחים. הצורך במיקום חללי העבודה בסמוך לפתחים אף מגביל את הרחב האידיאלי של הבניין. אם ממדי המגרש או הפרוגרמה מחייבים תכנון בניין עמוק במיוחד, מומלץ לשקול שילוב חצר פנימית (אטריום) אשר באמצעותה ניתן להבטיח תאורה טבעית לחלקי בניין הממוקמים רחוק מן החזית החיצונית.

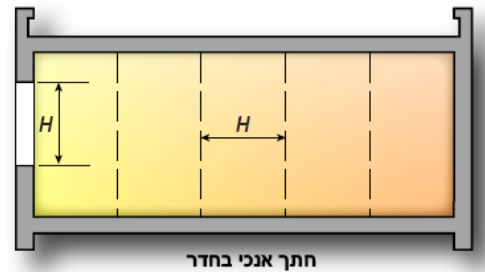
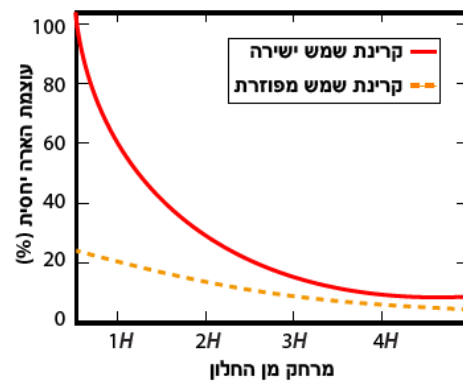
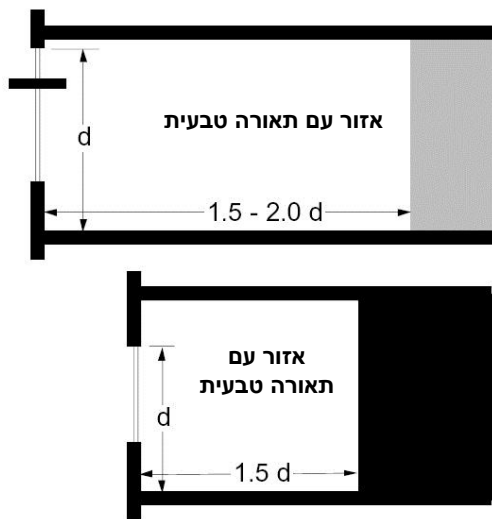


4.5 עומק חללי עבודה

עוצמת ההארה הטבעית בחלל הבניין יורדת ירידה חדה עם גידול המרחק מן החלון. לכן רצוי כי עומקם של החדרים המיועדים לקבל אור טבעי יהיה קטן.

כלל אצבע נוח קובע כי כאשר חודרת מבעד לחלון קרינת שמש ישירה, עומק החלל המואר באור טבעי שווה לפעם וחצי הגובה של משקוף החלון מעל הרצפה, בקירוב. אם משולב בחלון אמצעי לניתוב האור לעומק החלל, כגון מדף אור, ניתן להגדיל את עומק המשרד עד לפי 2 מגובה המשקוף של הפתח.

התקן הישראלי לדירוג בניינים לפי צריכת אנרגיה: בנייני משרדים (ת"י 5282 חלק 2) מדרג את המשרדים לפי עומק החלל, בהתייחס לחזית בה ממוקם החלון – 5 מטר או 8.2 מטרים. לא ניתן לקבל דירוג גבוה למשרד אשר עומקו עולה על 8.2 מטרים, וישנו יתרון מובהק למשרדים אשר עומקם קטן.



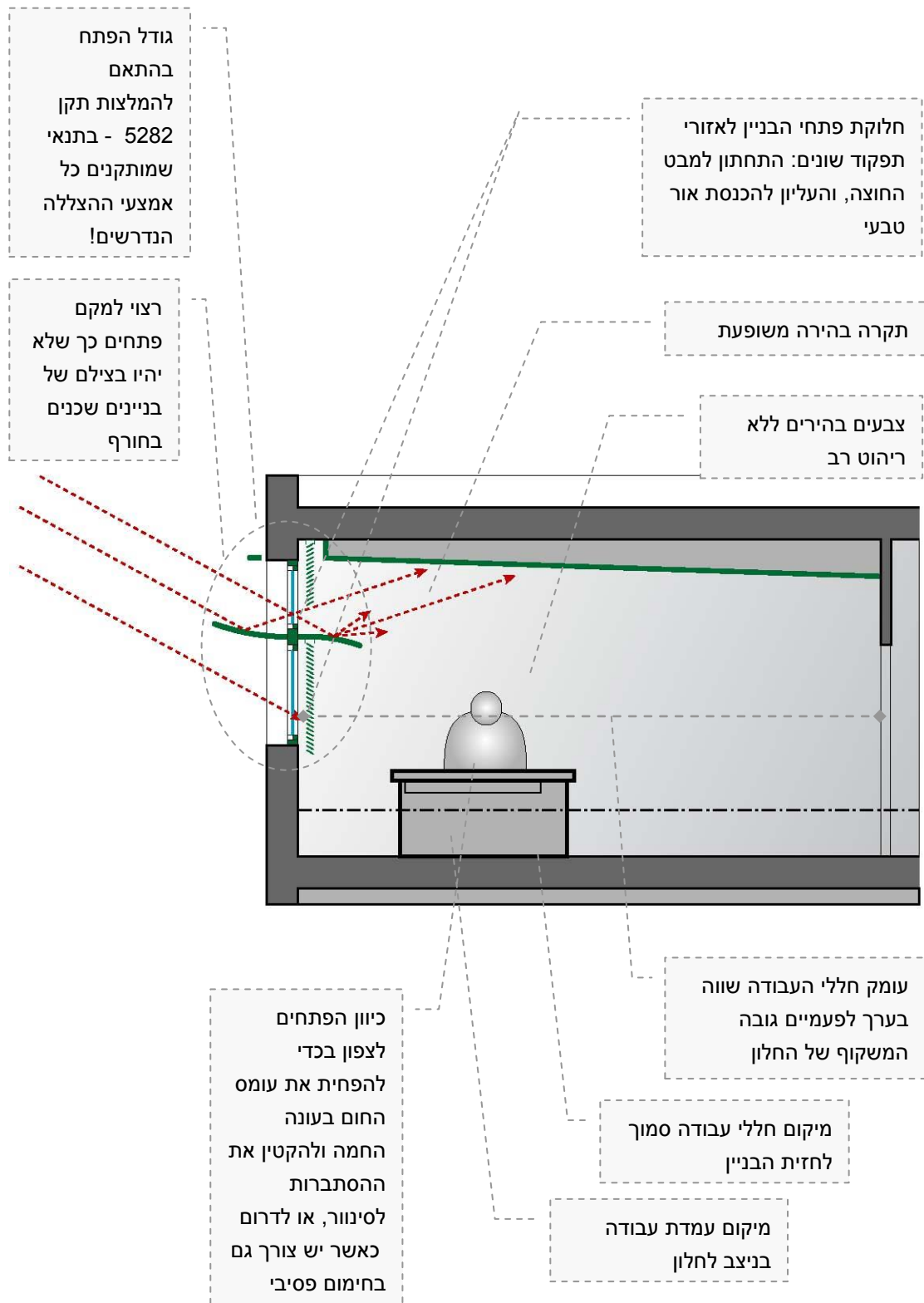
עוצמת הארה פוחתת במהירות כאשר מתרחקים מן החלון

עוצמת ההארה הטבעית פוחתת ככל שמתרחקים מן החלון. עומקו של האזור הנהנה מאור טבעי במידה משמעותית הוא כ- 1.5-2 פעמים גובה המשקוף של החלון.^[6]



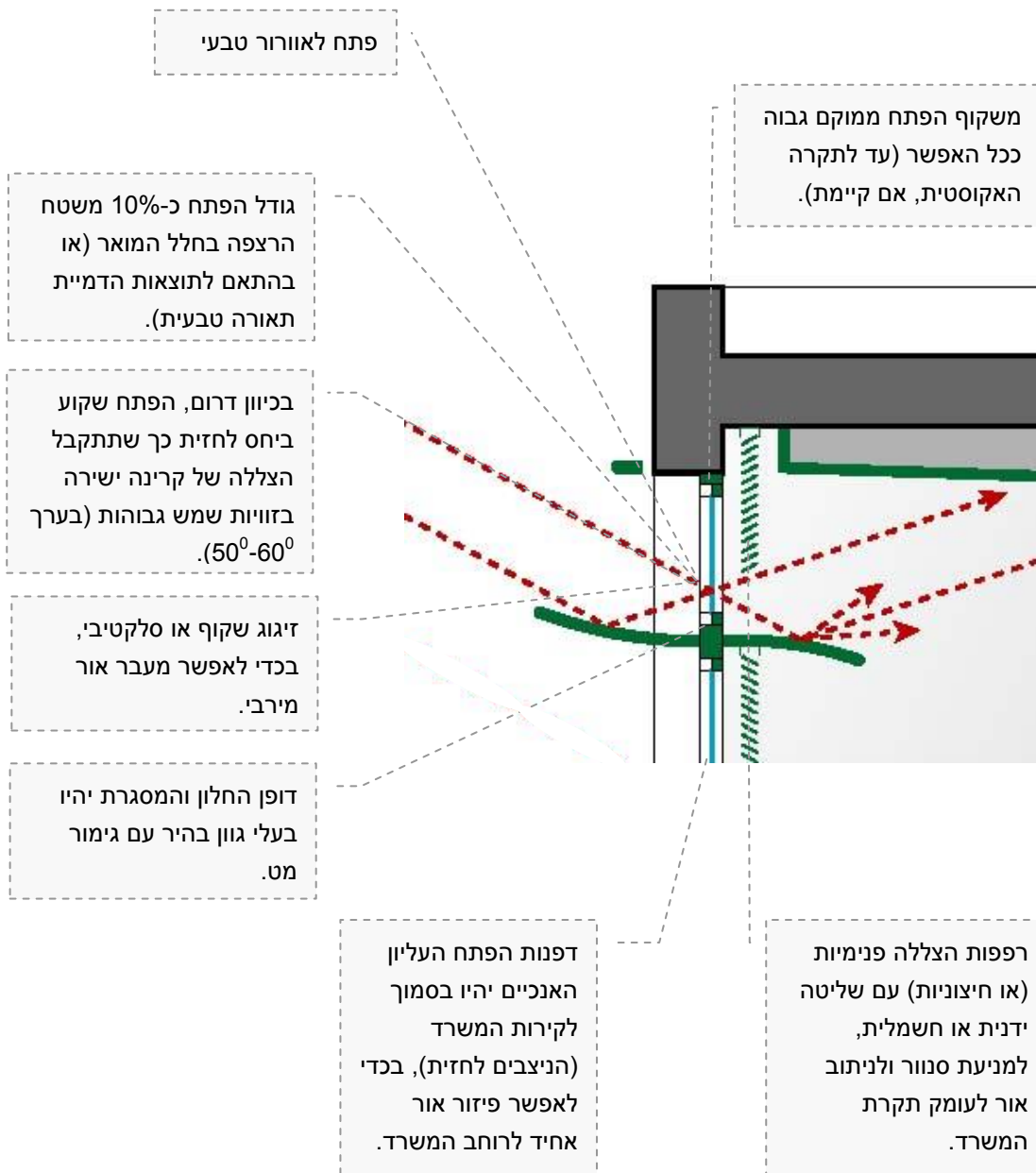
5. פתרון עקרוני לתאורה טבעית משופרת

5.1 חתך סכמתי במשרד עם חלון בכיוון דרום

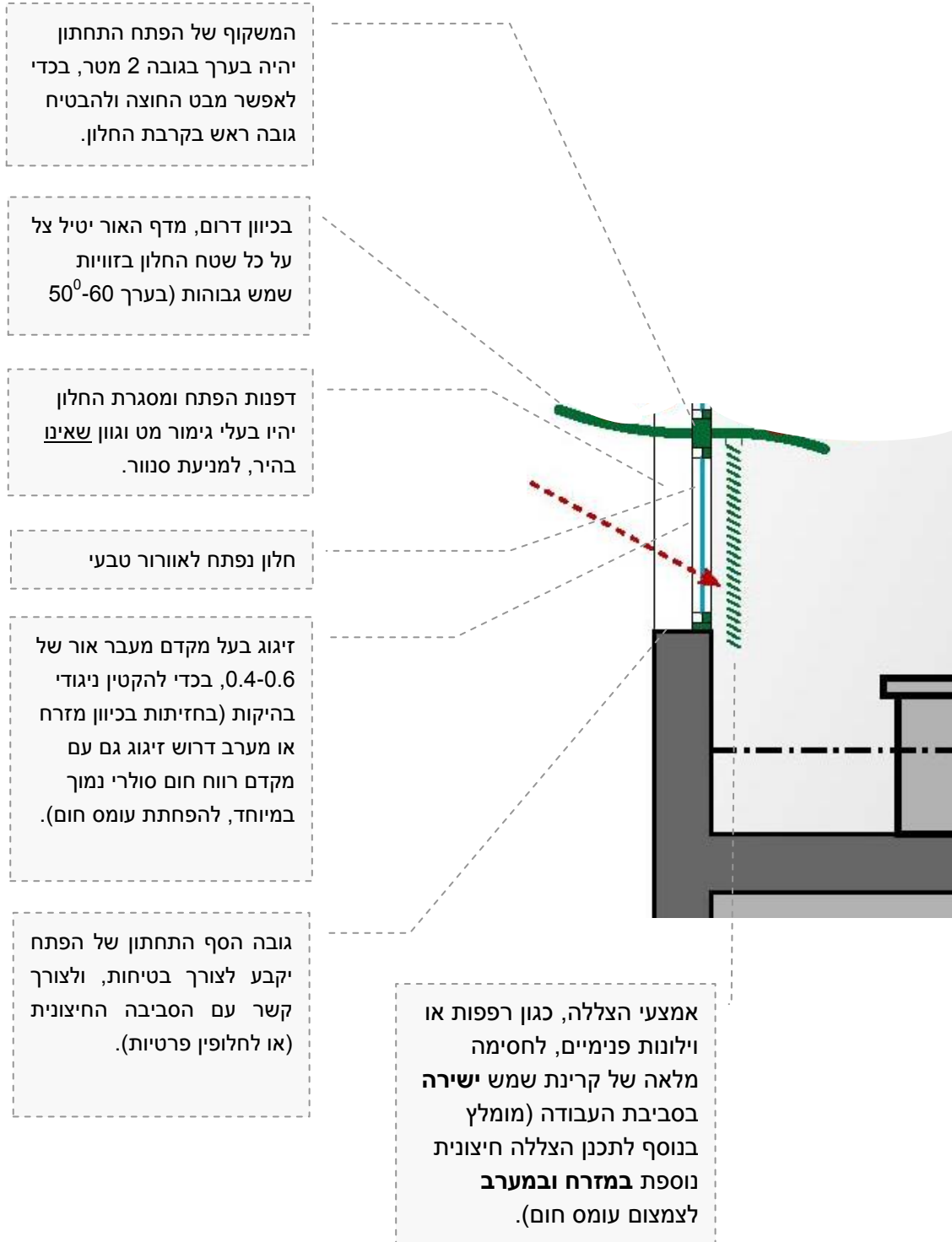


5.2 הפתח העליון

(ראו גם פרק 6.4)



5.3 הפתח התחתון (ראו גם פרק 6.5)

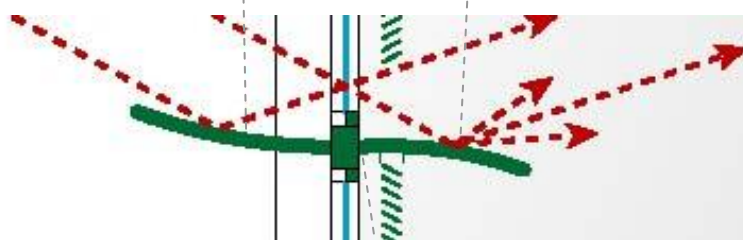


5.4 מדף אור-הצללה

(ראו גם פרק 6.6)

מדף חיצוני להצללת הפתח התחתון מזוויות שמש גבוהות (בערך 50° - 60°), וכן לניתוב אור לתקרת המשרד. מומלץ כי צדו העליון יהיה בהיר ורפלקטיבי, וכי צדו החיצוני יהיה בעל פרופיל קעור הנטה מעט כלפי מעלה (בכדי לכוון את החזר האור לעומק תקרת המשרד).

מדף פנימי המונע מקרינת השמש הישירה המגיעה מהפתח העליון מלהגיע לסביבת העבודה (ובכך להקטין את ההסתברות לסנוור ולהפחית את עומס חום על העובדים). מומלץ כי צדו העליון יהיה בעל פרופיל קמור (בשל יכולתו לפזר אור לשטח רחב יותר של התקרה), וכי יהיה בעל צבע בהיר ורפלקטיבי (בכדי לאפשר החזרה מירבית של אור).



מדף אור יותקן בין הפתח העליון לפתח התחתון, לכל רוחב הפתח (ואף מעבר אליו).

הערה:

בכדי להקטין את עומס החום, לצמצם את הסתברות לסינוור, ולהגדיל את עוצמת ההארה בעומק החלל מומלץ כי גודל הפתח העליון, עומק מדף האור, זווית מדף האור, ורפלקטיביות מדף האור יקבעו באמצעות הדמיות תאורה טבעית ממוחשבות.



5.5 פתרון עקרוני לפתחים בכיוון מזרח ומערב

הפתרון דומה לזה המוצע לחזית הדרומית, אך כולל בפתח התחתון הגנה נוספת מקרינת שמש ישירה הכוללת אמצעי הצללה אנכיים הנוטים צפונה, בשילוב עם מדפי הצללה אופקיים הנוטים מטה או זיגוג בעל מקדם מעבר אור נמוך במיוחד (בפתח התחתון בלבד).



דוגמא לפתרון עקרוני לחלון בחזית מערבית (בניין משרדים, פיניקס, אריזונה)

5.6 פתרון עקרוני לפתחים בכיוון צפון

שלא בדומה לחזיתות האחרות, בחזית הצפונית אין תועלת רבה במדף אור משום שבכיוון זה יש מעט מאוד קרינה ישירה. ניתן אפוא לתכנן פתח אחד גדול המגיע קרוב ככל הניתן לתקרה, עם זיגוג שקוף. בכל מקרה מומלץ להתקין גם רפפות או וילונות הצללה פנימיים המיועדים להפחית את בהיקות הרקיע ולחסום קרינת שמש ישירה בשעות לפני השקיעה בשיא הקיץ. הגנה נוספת יכולה להיעשות על ידי מדפי הצללה חיצוניים אנכיים.



דוגמא לפתרון הצללה לחלון בחזית צפונית (בניין הספרייה העירונית, פיניקס, אריזונה)



6. חלופות אדריכליות לתאורה טבעית

פרק זה מתאר חלופות למרכיבי הפתרון העקרוני לתאורה טבעית משופרת אשר הוצג בפרק הקודם.

6.1 גודל החלון

גודל הפתח הוא אחד הגורמים העיקריים המשפיעים על כמות האור טבעי אשר חודרת לחלל המשרד, בהתחשב בסך הכל האור המגיע לחזית הבניין (אשר מושפע בתורו ממאפיינים סביבתיים כגון ההפניה והצללה מבניינים שכנים או מצמחייה).

מדריכי תכנון רבים כוללים הנחיות אשר ממליצות על שטח החלונות ביחס לשטח החזית (Window to Wall Ratio - WWR). גם התקן הישראלי ת"י 5282, חלק 2: דירוג בנייני משרדים לפי צריכת אנרגיה, כולל רשימה מפורטת של יחסי WWR בבנייני משרדים בהתאם לעומק המשרד, לאזורי האקלים בארץ ולחזית אליה פונה החלון. התקן נערך על בסיס סימולציות מחשב אשר התבצעו בהנחה כי עוצמת ההארה הרצויה על משטח עבודה אופקי תהיה לפחות 500 לוקס. במקביל לדרישה הנוגעת לגודל החלון, כולל ת"י 5282 גם הנחיות מפורטות בנוגע למערכת ההצללה על החלון, באמצעות הצללה חיצונית קבועה או הצללה ניידת (פנימית או חיצונית). ההנחה אשר הנחתה את עורכי התקן היתה כי מערכת ההצללה הניידת תופעל כך שתמנע חדירת קרינת שמש ישירה מבעד לחלון, אך תאפשר חדירת קרינת שמש מפוזרת ללא הגבלה בשאר הזמן. מערכת ההצללה החיצונית הקבועה כוללת תמיד מדף אור.

אזור אקלימי	עומק	דרגה
א	עד 5.0 מ'	1

מספר סידורי	מאפייני הבניין ^(א)	כיווני חזיתות					
		צ (N)	צמז (NE)	מז (E)	דמז (SE)	ד (S)	דמע (SW)
1	מערכת בקרת תאורה	L1 או L2 או L3					
2	הצללה קבועה	VILs, VsLI, VsLs, HILI, HILs, HsLI, HsLs, LI, Ls ^(ב)					
3	הצללה דינמית	פנימית או חיצונית ^(ב)					
4	סוג הזינוג	G4 או G3		G5 או G4 או G3		G5 או G4 או G3 או G2 או G3 או G4 או G5	
5	שטח זינוג ב-% משטח הרצפה (מקסי' ומיני')	32-20		35-18		35-15	

דוגמה להמלצות ת"י 5282 (חלק 2) בנוגע לחלונות בבניין משרדים באזור א' (רצועת החוף). מקרא המסביר את הסמלים המגדירים את הדרישות עבור מערכת ההצללה וסוג הזינוג מצוי בגוף התקן.^[7]

אף כי ההנחיות בחלק המרשמי של תקן 5282 הן מפורטות מאוד, בפועל הן אינן נותנות מענה לכל מגוון הפיתרונות האפשריים. על מנת לתת למתכנן גמישות מרבית, קובע התקן כי ניתן לבחון את התפקוד של בניין בעזרת סימולציה ממוחשבת הנערכת באמצעות כלים מתאימים (אשר לא הוגדרו לפי שעה).

נקודת התורפה העיקרית בחלק זה של התקן היא התלות בבקרה על ההצללה הפנימית הניידת. כלומר, אם בבניין מותקנים תריסים ונציאניים פנימיים, מניחים שדירי המשרד מפעילים אותם באופן אוטומטי כך שיתקבל חיסכון מרבי באנרגיה. סקר מצומצם שנערך במסגרת מחקר זה מצא כי בפועל חלק ניכר



מדיירי המשרדים אינם משנים את מצב התריסים על בסיס יומי בהתאם לתנאי התאורה המשתנים, כך ש בפועל התריסים סגורים רוב ימות השנה.

אם סוג הזיגוג מאפשר מעבר אור מרבי (כגון זכוכית המוגדרת כ'זכוכית שקופה'), ניתן להשתמש בכלל אצבע הקובע שעומק החלל בו התאורה הטבעית יעילה הינו שווה ערך לפעם וחצי גובה המשקוף של החלון מעל הרצפה. לפיכך גודל החלון יושפע מגובה המשקוף, אשר יקבע בהתאם לעומק החלל הרצוי. כאשר הזיגוג אינו מאפשר מעבר אור מרבי (מאחר ובחלונות רבים מותקנת מערכת זיגוג המיועדת להפחתת עומס החום), ניתן להשתמש בשיטת החישוב המומלצת בתקן האמריקאי LEED v3 לצורך קביעת גודל החלון:

$$0.18 > \text{היחס בין שטח החלון לשטח רצפה} \times \text{מקדם מעבר אור של הזיגוג} > 0.15$$

כללי האצבע ושיטות החישוב האלה מתאימים להערכת התאורה הטבעית המתקבלת באזורים בהם השמיים מעוננים (CIE Standard Overcast Sky), אך אינם מתאימים לחישוב גודל החלונות הרצוי בישראל, שבה השמיים הם בהירים וללא עננים במרבית ימות השנה.

ההבדלים בין שמיים מעוננים לשמיים בהירים נוגעים לא רק לעוצמת ההארה המתקבלת, אלא גם – ואולי בעיקר – לכיוונויות של קרינת השמש: בעוד ששמיים מעוננים מאופיינים בקרינה מפוזרת המגיעה מכל כיוון הרקיע, בשמיים בהירים קרינת השמש הישירה, המגיעה מכיוון מוגדר בכל רגע, היא בעלת תרומה מכרעת.

באופן כללי שמים ללא עננות מאפשרים עוצמת הארה טבעית גבוהה יותר ולפיכך ניתן לתכנן חלונות בעלי שטח מצומצם יותר. הערכת גודל החלון הרצוי תעשה באופן המדויק ביותר בעזרת הדמיית תאורה טבעית ממוחשבת.

6.2 סוג הזיגוג

יחידת זיגוג יכולה להיות מורכבת משמשה יחידה 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 לבחירה 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 מקטינה רק במעט 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% 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.



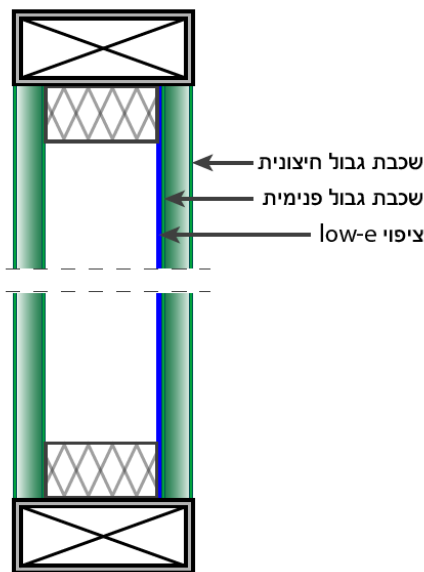
המלצה: חלון המשמש לתאורה טבעית (כגון חלון מעל מדף אור) יהיה בעל מעבר אור גבוה ככל האפשר – לפחות 60 אחוז. חלון המיועד בעיקר למבט החוצה יהיה בעל מעבר אור של 30-50 אחוז בלבד, ויצויד במערכת הצללה ניתנת לכיוון.

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. מוליכות תרמית נמוכה אפשר לקבל רק באמצעות מערכת זיגוג העשויה 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 coating, 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 בתרשים הבא:



מעבר החום בזיגוג כפול

מאחר ולזכוכית עצמה ישנה מוליכות תרמית גבוהה מאוד, הרי שעיקר ההתנגדות למעבר חום בחלון בעל שמשות אחת היא תוצאה של שכבות הגבול הנוצרות באוויר הסמוך אליה, בשני צדדיה. 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, בדרך כלל) 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 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 יהיה בעל יחס של 1.44. בזכויות 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 בצד הפנימי של השמשה המגוונת.

2. זכוכית מחזירה ('מראה'): זיגוג בזכוכית מחזירה 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 (כלומר המבריקים) לא יחזירו את כל הקרינה הפוגעת בזיגוג, ועדיין תהיה חדירת קרינה בסדר גודל של 10-35 אחוז, לפי סוג הזיגוג שנבחר. יש לזכור כי השימוש בזכוכית מראה על פני חזיתות גדולות עלול לגרום מטריד 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.

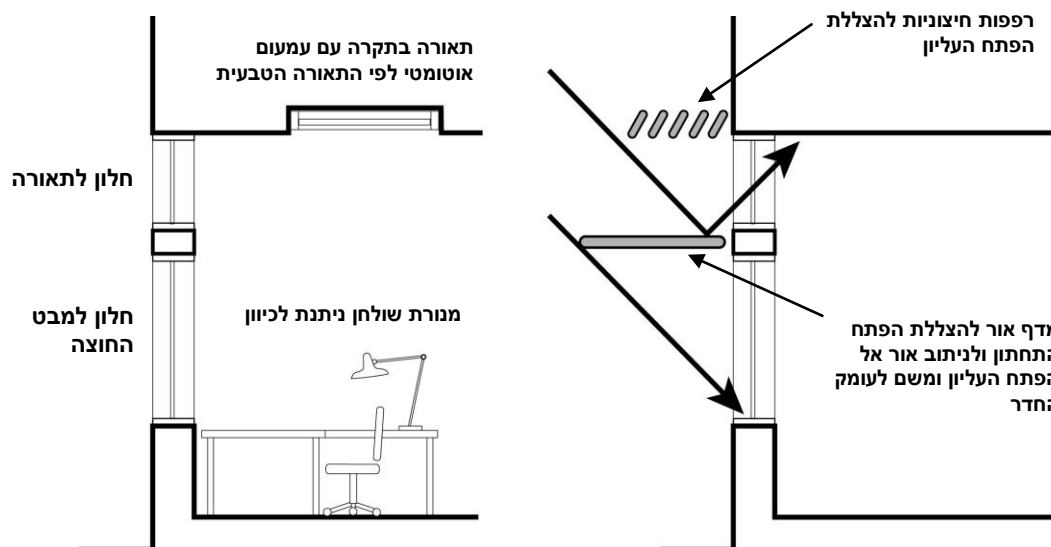
6.3 חלוקת פתחי הבניין לאזורי תפקוד שונים: האחד למבט והשני להכנסת אור טבעי

פתחי הבניין נועדו לאפשר מספר תפקודים שונים מלבד הכנסת אור טבעי: מבט לסביבה החיצונית, אוורור טבעי וחימום פסיבי. במקביל, נדרשים החלונות לאפשר לדיירי הבניין גם פרטיות – ויזואלית ואקוסטית, ולהפחית עומסי חום כאשר עודף האנרגיה איננו רצוי ומעמיס על מערכות המיזוג של הבניין. נמצא כי ניתן להשיג תפקוד אופטימלי של פתח הבניין במידה ולא נתייחס אליו כיחידה תפקודית אחת, אלא כמספר יחידות אשר מיועדות לספק מענה לדרישות שונות. כך ניתן לצמצם או אולי אף למנוע סתירות הנוצרות בעת הגדרת תכונות החלונות במענה לדרישות התפקודיות השונות.

החלוקה העיקרית הינה חלוקה תפקודית של פתח הבניין לפתח עליון ופתח תחתון המאפשרים תפקוד שונה. חלוקה זאת עדיפה מכיוון שהיא מאפשרת כניסת אור לעומק החלל מהפתח העליון, גם בעת שהפתח התחתון מוצל בכדי למנוע סינוור בשל כניסת קרינת שמש ישירה.

ניתן לשקול אף חלוקה אופקית של פתח הבניין, כגון פתח מרכזי למבט החוצה ופתחים צרים אנכיים בסמוך לקירות המשרד הניצבים לחזית להכנסת אור טבעי. חלוקה זאת מאפשרת כניסת אור המוחזרת מהקירות לעומק החלל מהפתחים הצידיים, גם בעת הצורך בהצללת הפתח המרכזי למניעת סינוור. חשוב לציין כי חלוקה זאת עלולה להעלות את בהיקות הקירות החשופים לקרינת השמש הישירה, ובמידה ואלו ימצאו במרכז שדה הראיה של דיירי המשרד תעלה ההסתברות לסינוור. לפיכך חלוקה זאת נחותה מבחינת השגת נוחות וויזואלית בהשוואה לחלוקה לפתח עליון ופתח תחתון.





חלוקה בסיסית של החלונות בחתך אנכי של הקיר החיצוני:
עם מדף אור חיצוני (מימין) וללא מדף אור (משמאל) [8]

6.4 אפיון הפתח העליון

מיקום

מומלץ כי משקוף הפתח העליון יהיה גבוה ככל האפשר, בכדי לאפשר חדירת אור טבעי לעומק המשרד. כאשר המשרד כולל תקרת ביניים כגון תקרה אקוסטית, המשקוף של הפתח העליון יהיה בגובה תקרה זאת (לפיכך מומלץ לתכנן תקרת ביניים גבוהה ככל האפשר בסמוך לחלון העליון). מומלץ כי גודלו של הפתח העליון יאפשר השגת עוצמת הארה טבעית נאותה במרבית שטחי המשרד גם כאשר הפתח התחתון מוצל לגמרי. גובה הסף של החלון העליון יושפע גם מהרצון לאפשר מבט כלפי חוץ מבעד לפתח התחתון ללא הפרעה. כלומר, רצוי שהוא יהיה לפחות בגובה העיניים של אדם עומד. כאשר ישנה גישה חופשית סמוך לקיר החיצוני, על מדף האור להיות מעל גובה ראש. עוד מומלץ כי הפתח העליון ימשך לכל רוחב החזית, ובפרט סמוך לקירות הפנימיים הניצבים לחלון, בכדי לאפשר החזרת אור מקירות אלה ולקבל פיזור אור אחיד לרוחב המשרד.

עומק

כאשר הזיגוג בפתח העליון שקוע ביחס למישור החיצוני של החזית, חלק מפני הזכוכית יהיו מוצלים בכל רגע נתון. יש להביא בחשבון את הצללה הזאת, הן כאשר מחשבים את עומסי החום על הבניין והן בהתייחס לכמות האור העוברת מבעד לחלון. מומלץ לחשב את עומק הפתח כך שהוא יחסום את קרינת השמש הישירה משעות הבוקר המוקדמות ועד שעות הצהריים המאוחרות בעונה החמה. הצללה זו תביא גם להפחתת הסינוור הנגרם עקב כניסת קרינת שמש ישירה בזוויות שמש גבוהות, אולם אין בו די בכדי למנוע סינוור בזוויות שמש נמוכות. לשם כך נדרשת הצללה נוספת.

צבע דופן חלון ומסגרת

בפתח העליון מומלץ כי צבע דופן הבנויה והמסגרת יהיו בעלי גוון בהיר, בכדי לאפשר כניסה מרבית של אור המוחזר מקרינת שמש הפוגעת בחלקי בניין אלו. רצוי כי הצבע יהיה בעל גימור מט, בכדי למנוע



החזרות כיווניות אשר עלולות לגרום לסינוור אם הדופן תימצא בשדה הראיה של העובדים – למרות שגימור זה הוא בעל מקדם החזרה מעט נמוך יותר וכמות האור אשר תנותב אל הבניין תקטן.

סוג זיגוג

בפתח העליון מומלץ כי הזיגוג יאפשר מעבר אור מרבי. אם הפתח אינו מוצל ניתן להשתמש בזיגוג סלקטיבי, בעל העברות גבוהה של קרינת שמש בתחום הנראה, והעברות נמוכה של קרינת שמש באורכי גל ארוכים (להפחתת עומס החום). באזורים קרים אשר בהם יש צורך בחימום פסיבי בחורף הזיגוג הסלקטיבי איננו מומלץ, במיוחד בכיוון דרום.

אמצעי הצללה וניתוב אור טבעי

כאשר זוויות השמש נמוכות (כגון אלו בימי החורף בחזית הדרומית, המזרחית, והדרומית; ובכל עונות השנה בשעות הזריחה/השקיעה בחזית מזרחית/מערבית; ובשעות הזריחה/השקיעה בקיץ בחזית הצפונית), חודרת קרינת שמש ישירה גם מבעד לחלון העליון, ולכן יש צורך להתקין גם עליו הצללה. הצללה זאת חיונית למניעת סינוור העובדים השוהים בחלל המשרד. מכיוון שהפתח העליון נועד בעיקר להכנסת אור טבעי לעומק החלל, מומלץ כי אמצעי ההצללה בפתח הזה ימנעו חדירת קרינת שמש ישירה העלולה להגיע לעיני העובדים בכל שעות העבודה. עם זאת, עליהם לאפשר ניתוב של האור הטבעי הפוגע בהם לעבר תקרת המשרד במרחק רב ככל האפשר מן החלון. לשם כך ניתן להיעזר ברפפות עם שליטה ידנית או חשמלית בזווית (או אף עם בקרה ממוחשבת אשר מיועדת להתאים את זווית הרפפות בהתאם לשינוי בזוויות השמש לאורך השנה). ניתן להשתמש ברפפות קבועות בעלות חתך משוכלל המאפשר המונע חדירת קרינת שמש ישירה אך מאפשר הפניית קרינת שמש מוחזרת לכיוון תקרת המשרד. למרות שהרפפות הן קבועות ואינן דורשות בקרה מתמדת של דיירי המשרד הן עשויות לאפשר תאורה טבעית יעילה למדי.

מומלץ כי צבע אמצעי הצללה יהיה בהיר ורפלקטיבי בכדי לאפשר החזרת אור מקסימאלית לעומק המשרד. רצוי גם כי הדופן התחתונה של הרפפות תהיה כהה יחסית, בכדי להפחית את הסיכוי לסינוור הנוצר מהחזרי אור בין הרפפות (אם כי קשה למצוא רפפות בעלות משטח עליון בהיר ותחתון כהה יותר). כאשר המשרד עמוק במיוחד וגם התקרה נמצאת בשדה הראיה של העובדים במקום עבודתם, מומלץ כי גם הצד העליון של הרפפות יהיה מחוספס במעט, בכדי למנוע הווצרות של פסי אור בהירים וכהים לסירוגין על גבי התקרה – למרות שעוצמת ההארה הכוללת המתקבלת כתוצאה מכך עשויה להיות מעט נמוכה יותר.

6.5 אפיון הפתח התחתון

מיקום

מומלץ כי משקוף הפתח התחתון יהיה מעט מעל גובה העיניים של אדם עומד, בכדי לאפשר מבט לנוף ללא הפרעה חזותית. לעיתים מותקן מדף אור פנימי מעל גובה זה, ובמקרה כזה על משקוף החלון להיות מעל גובה ראש (לפחות 2 מטרים מעל הריצוף). בדומה לחלון העליון, מומלץ כי מיקום הפתח התחתון יגיע עד סמוך לקירות המשרד (הניצבים לחזית), בכדי לאפשר פיזור אור אחיד לרוחב המשרד ולצמצם את ניגודי הבהיקות בין הקיר והפתחים. אם ישנם מספר פתחים לרוחב החזית מומלץ לקבוע אותם במרווחים שווים בכדי לאפשר פיזור אור אחיד לרוחב המשרד. רצוי גם כי העמודונים בין הפתחים יהיו צרים ככל האפשר, בכדי להפחית את ניגודי הבהיקות בין החלון לבין הקיר. גובה הסף התחתון של הפתח נקבע בדרך כלל משיקולים שאינם קשורים לתאורה (כגון מבט החוצה, פרטיות ובטיחות): כניסת תאורה טבעית בחלק התחתון של החלון (ובמיוחד מתחת לגובה השולחן) אינה תורמת רבות לעוצמת ההארה של אזור העבודה במשרד מכיוון שהיא מאירה בעיקר את הרצפה בסמוך לחזית.



עומק הפתח

במידה וזיגוג הפתח התחתון שקוע מחזית הבניין, דופן הפתח התחתון (או מדף אור-הצללה הממוקם מעליו) יאפשר הצללת הזיגוג ובהתאם הפחתת עומס החום במשרד. ולפיכך מומלץ לחשב את עומק הפתח בכדי לאפשר חסימת זוויות שמש משעות הבוקר המאוחרות עד שעות הצהריים המאוחרות בעונה החמה. הצללה זאת תאפשר גם הפחתת הסינוור הנגרם מכניסת קרינת שמש ישירה מזוויות שמש גבוהות, אולם עדיין נדרשת הצללה נוספת למניעה סינוור מזוויות שמש נמוכות.

צבע דופן הפתח ומסגרת החלון

ההסתברות שהפתח התחתון יהיה בשדה הראייה של העובדים גדולה מזאת של הפתח העליון, ולכן מומלץ להימנע מתכנון דופן פתח ומסגרת חלון בעלי צבע בהיר או בעל גימור מבריק, העלולים לגרום לסינוור עקב החזרי אור גבוהים כאשר קרינת שמש ישירה פוגעת בהם.

סוג זיגוג

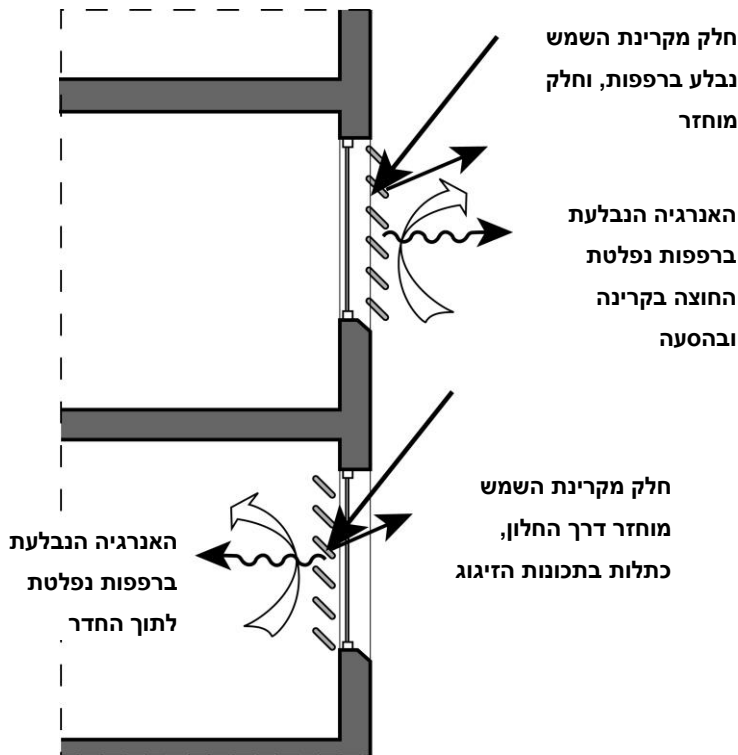
בניגוד לפתח העליון, התפקיד העיקרי של הפתח התחתון אינו הכנסת אור טבעי לחלל אלא פתיחת מבט אל הסביבה החיצונית (בתנאי שהפתח עליון מאפשר כניסת תאורה טבעית מספקת). לפיכך הזיגוג בפתח התחתון יכול להיות בעל מעבר אור נמוך יותר (אשר אופייני לזיגוג המאפשר הפחתת עומס החום). ניתן להתקין בפתח זה זיגוג סלקטיבי, אם כי סביר להניח שההשקעה הכלכלית לא תצדיק את עצמה מכיוון שפתח זה אינו מקור האור העיקרי (אלא הפתח העליון). זיגוג בעל מעבר אור נמוך במיוחד (30%) יאפשר הקטנת ניגודי בהיקות במשרד ולפיכך יוריד את ההסתברות לסינוור. עם זאת, ניסויים מראים שבתנאי הארץ, גם מעבר אור של 50% או אף פחות למטה מכך אינם מונעים סינוור ואינם מבטיחים נוחות ויזואלית כאשר בחלון פוגעת קרינת שמש ישירה: לשם כך נדרשים אמצעי הצללה נוספים כגון תריס ונציאני פנימי או וילון. למרות שישנו צורך באמצעי הצללה אלה, בכל זאת מומלץ להתקין בפתח התחתון זיגוג בעל מעבר אור של 30-50% בכדי להפחית את הבהיקות הנוצרות מקרינת השמש המפוזרת הפוגעת בחלון גם בשעות שבהן הוא אינו חשוף לקרינת שמש ישירה.

לעתים 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 הראיה 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 סלקטיביות גבוהה בהעברת קרינת שמש בתחום הנראה.

אמצעי הצללה

אם ישנה אפשרות של כניסת קרינת שמש ישירה לשדה הראיה של העובד מבעד לפתח התחתון, יש צורך באמצעי הצללה בכדי להשיג נוחות ויזואלית במשרד. מומלץ לאפשר הצללה מלאה של פתח זה בכל החזיתות, מלבד הצפונית בה ניתן להסתפק במדפי הצללה אנכיים. בניגוד להצללות חיצוניות אשר מיועדות בעיקר להפחית את עומס החום, ולפיכך הינן לעיתים מרווחות, הצללה בפתח התחתון למניעת סינוור צריכה להיות מלאה. היא יכולה להיעשות על ידי רפפות או וילונות פנימיים, אשר יותקנו בנוסף להצללה החיצונית, אלא אם מדובר בהצללה ניידת המאפשרת הצללה מלאה של החלון מבחוץ.





הבחירה בין אמצעי הצללה חיצוניים או פנימיים איננה חד משמעית. מבחינת צמצום עומס חום מומלץ השימוש באמצעי הצללה חיצוניים, משום שהם מפחיתים את שטף הקרינה החודר מבעד לזכוכית ומעמיס על מערכת המיזוג, ומשום שהחום הנבלע באלמנטי ההצללה עצמם יפלט בעיקר מחוץ לחלל המשרד. אולם מבחינת יעילות השימוש בתאורה הטבעית הדילמה מורכבת יותר: אמצעי הצללה פנימיים הם בדרך כלל מתכוונים, בעוד שהאמצעים החיצוניים הם בדרך כלל קבועים (אם כי ישנם גם אמצעי הצללה חיצוניים מתכוונים: עלותם גבוהה יותר, משום שהם נדרשים לעמוד בפני רוחות חזקות ואבק. מרבית האמצעים האלה, כגון תריסים ונציאניים חיצוניים בהפעלה חשמלית, מתאימים רק לבנייני משרדים נמוכים). לפיכך האמצעים הפנימיים מאפשרים

הצללה חיצונית יעילה יותר מהצללה פנימית בהקטנת רווח החום הסולרי.

לדוגמא: כאשר רפפות לבנות מותקנות מחוץ לחלון, רווח החום האופייני הוא 12% בלבד, בהשוואה לכמעט 50% כאשר הן מותקנות בתוך הבניין.

בקרה מיטבית על עוצמת ההארה הטבעית וצמצום הבהוק. עם זאת, הניסיון מלמד שבפעול מרבית העובדים אינם מתאימים את מצב התריסים הפנימיים לתנאי התאורה המשתנים. בדרך כלל התריסים נסגרים כאשר ישנה כניסה של קרינת שמש ישירה הגורמת לסינוור, ואינם נפתחים עוד, גם כאשר פתיחתם עשויה להועיל. בתנאים האלה החלל נשאר ללא תאורה טבעית, ונעשה שימוש רציף בתאורה מלאכותית.

ניתן לשקול הפעלה אוטומטית של אמצעי הצללה, בין אם הם פנימיים או חיצוניים. הפעלה כזאת יכולה להיות מבוקרת באמצעות חישני אור, או בהתאם ללוח זמניים ממוחשב. רצוי כי תהיה אפשרות גם לשליטה ידנית במערכת זאת, משני טעמים עיקריים:

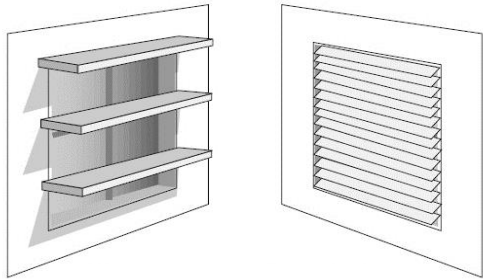
א. ישנה שונות ניכרת במידת הרגישות של בני האדם לגירויים ויזואליים, ולא ניתן להגדיר תנאים אשר בהם יהיו כולם מרוצים.

ב. מחקרים רבים מראים כי עצם היכולת לשלוט בסביבת העבודה, ללא קשר לתנאים המועדפים, מביאה לשביעות רצון גדולה יותר של העובדים.

ניתן לספק הצללה בפתח התחתון באמצעות מערכות הצללה שונות כגון רפפות אופקיות, רפפות אנכיות, רפפות בעלות פרופיל משוכלל, וילונות הזזה, וילונות גלילה, סבכת שתי וערב או צמחיה. מערכות הצללה יכולות להיות קבועות או דינאמיות. המערכות הדינמיות בדרך כלל מאפשרות להשיג

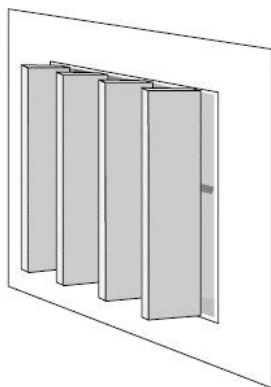


שליטה טובה יותר על איכות התאורה הטבעית מאשר זאת המושגת על ידי המערכות הקבועות: מצד אחד הן מאפשרות בקרה על חדירת קרינת שמש ישירה לסביבת העובדים וניתוב אור לעומק התקרה, ומצד שני הן ניתנות לפתיחה בכדי לאפשר חדירה מרבית של אור מפוזר מהרקיע לחלל המשרדים כאשר לא מגיעה קרינת שמש ישירה לפתח.



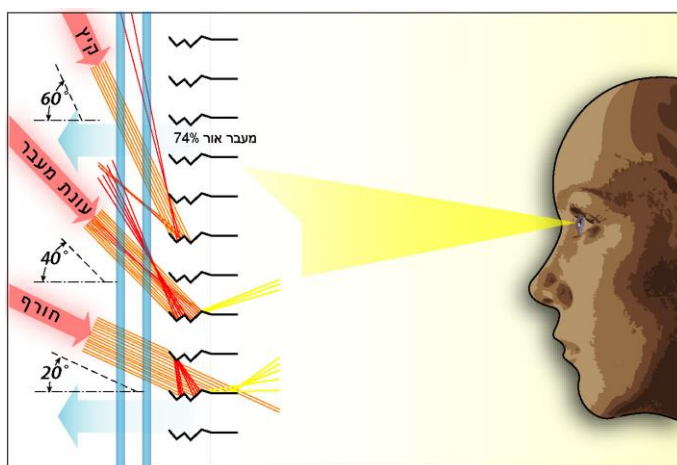
ניתן להקטין את עומק הרפפות על ידי הקטנת המרווח ביניהן

רפפות אופקיות מאפשרות להחדיר אור מוחזר לעומק תקרת החלל, בתנאי שהשמש איננה קרובה לאופק ובהנחה שזווית הרפפות נקבעת בהתאם לזווית קרני השמש באותו זמן. כאשר חלק מן החלון נמצא נמוך מעיני העובדים, הקרינה המוחזרת עלולה לגרום לסינוור. רפפות אופקיות אינן מונעות כניסה של קרינת שמש ישירה כאשר השמש נמוכה, ולכן הן יעילות פחות כאשר הן מותקנות בחלון מזרחי או מערבי.



רפפות אנכיות מתאימות בעיקר לחזית המזרחית או המערבית

רפפות אנכיות מאפשרות כניסת אור מפוזר רב מהרקיע בשעות שבהן קרינת השמש אינה פוגעת בניצב לפתח, ובהנחה שכיוון הרפפות מתאים. למשל: בחזית מזרחית, כאשר קרינת השמש מגיעה מדרום-מזרח (בבוקר), והרפפות נוטות צפונה, ניתן להחדיר אור באופן אחיד לרוב החלל. בניגוד לרפפות האופקיות, רפפות אנכיות אינן מאפשרות להטות את קרינת השמש כלפי התקרה, ולכן אינן מגדילות את עומק החלל המואר באור טבעי.



רפפות עם פרופיל משוכלל לתפקוד משתנה בהתאם לעונות השנה. [9]

רפפות בעלות פרופיל משוכלל מתוכננות למגוון דפוסי הצללה. ניתן למשל לייצר פרופיל המיועד להחזיר כלפי חוץ קרינת שמש מזוויות גבוהות ולנתב פנימה קרינת שמש הפוגעת ברפפה בזוויות נמוכות (ראו דוגמא משמאל). פרופיל נוסף מאפשר באמצעות חתך דמוי מסור להחזיר את כל קרינת השמש הישירה החוצה, אך אינו מונע מבט החוצה. רפפה זו אף מאפשרת כניסת אור מפוזר למשרד גם בזוויות שמש נמוכות, בעוד שרפפות בעלות פרופיל שטוח או קמור פשוט גורמות לסינוור בתנאים אלה.



וילונות הזזה (אופקיים או אנכיים – "רומאים") דורשים סגירה מלאה של הפתח, ולפיכך עוצמת ההארה (וגם הסינוור) תיקבע בהתאם לשקיפות הוילונות. שלא בדומה לרפפות, אשר ניתן לכוון אותן בכדי להשיג עוצמת הארה שונה ובכדי לכוון את האור כלפי התקרה, פעולת הוילון קבועה ותלויה בתכונות האריג בלבד. וילון שקוף למחצה יאפשר לאור טבעי לחדור לחלל ויצמצם את הבוהק, אולם לא יוכל למנוע סינוור לחלוטין. מאידך, וילון המיועד לאפשר חדירה חלקית של האור אינו מאפשר האפלה מלאה של החלל (אשר נדרשת לעיתים בעת השימוש במקרן). ניתן להתגבר על מגבלה זאת על ידי התקנת שני וילונות, האחד להאפלה מלאה והשני להחדרה חלקית של אור ולצמצום הבוהק.

וילונות גלילה סובלים מאותן מגבלות הקיימות בוילונות הזזה בעלי קפלים, בהתייחס לשליטה בהעברת אור טבעי מחד ולמניעת סינוור מאידך. כאשר וילונות גלילה ממוקמים מתחת למדף הצללה ומתוכננים כך שיוכלו להיאסף כלפי מטה (שלא כמו בהתקנה המקובלת לפיה הוילון נאסף כלפי מעלה!), פתיחה חלקית שלהם תאפשר לחסום קרינת שמש ישירה בחלק התחתון של החלון בעוד החלק העליון יאפשר מעבר מלא של אור מפוזר מהרקיע. שיטה זאת מאפשרת כניסת אור טבעי גם כאשר ישנו צורך בפרטיות.

סבכת שתי וערב הינה אלמנט הצללה קבוע אשר מתאים בעיקר להפחתת עומס החום בפתחים. כאשר הסבכה צפופה, בדומה למשרבייה המסורתית בארצות ערב, היא תפחית את עוצמת ההארה במידה רבה, ותאפשר פרטיות רבה לשוכני המשרד. עם זאת, שבכה איננה מאפשרת בקרה של תנאי התאורה בהתאם לעונות השנה או לשינויי מזג האויר.

צמחיה הממוקמת בסמוך לזיגוג החלון, בדומה לסבכת שתי וערב, תאפשר בעיקר הפחתת עומס חום יעילה. מכיוון שאינה מאפשרת גמישות בהפעלתה, היא איננה מאפשרת השגת תאורה טבעית טובה או מניעת סינוור בהתאם לצורך בשעות השנה השונות. לצמחיה ישנם יתרונות סביבתיים נוספים (מלבד הבקרה על האור במשרד), אולם היא דורשת אחזקה, חשופה למחלות ואינה מבטיחה תנאים אחידים בכל שטח הבניין.

אמצעי הצללה יכולים להיות עשויים מחומרים שונים, ואלו ישפיעו על תפקודם. אמצעי הצללה שקופים למחצה ("חלביים" - המעבירים בעיקר אור מפוזר) נוטים להיות בהירים במיוחד כאשר הם חשופים לקרינת שמש ישירה ולכן יכולים לגרום לסינוור. לפיכך בחלון הנמצא בשדה הראיה של העובד עדיפים אמצעי הצללה מחומר אטום למעבר אור. ניתן אף לשקול התקנת שני סוגי הצללה: האחד אטום, למניעת כניסת קרינת שמש ישירה, והשני אטום למחצה, להפחתת בהיקות הרקיע כאשר אין קרינת שמש ישירה.



6.6 מדף אור-הצללה

מדף אור-הצללה (להלן, למען הפשטות – 'מדף אור') הינו אלמנט פשוט ויעיל במיוחד התורם רבות לכמות האור במשרד ולאיכותו. מדף זה ממוקם בין הפתח התחתון לפתח העליון ומשפר משמעותית את התפקודים השונים של שני הפתחים: המדף משמש להצללת הפתח התחתון, אך גם מגדיל את כמות האור החודרת דרך החלון העליון ומגיעה אל התקרה בעומק המשרד. מדף אור יכול להיות ממוקם באחד משני צידי החלון - הפנימי או החיצוני - וכן בשניהם גם יחד. צדו העליון של מדף האור משמש לניתוב אור אל התקרה. רצוי שתקרה זו תהיה בהירה, כך שהאור יוחזר ממנה ויתרום לתאורה באזור העבודה בעומק המשרד.

מדף אור חיצוני

המדף החיצוני משמש להצללת הפתח התחתון ולניתוב אור לתקרת המשרד מקרינת שמש אשר לולא המדף הייתה מגיעה לפתח התחתון. ניתוב האור מן הפתח התחתון לעבר הפתח העליון מביא לניצול יעיל יותר של קרינת השמש, בכל עונות השנה: הוא מגדיל את כמות האור החודרת קרוב לתקרה, שם תרומתה לתאורה הטבעית רבה ביותר, ומפחית את החשיפה לקרינה ישירה סמוך לחלון, שם היא גורמת מטרד לדיירי המשרד, ביחוד בעונה החמה, בלי קשר לטמפרטורת האוויר בחלל.

כאשר החלק התחתון של החלון, מתחת מדף האור, איננו חשוף לקרינת שמש ישירה, ניתן בדרך כלל לפתוח גם את מערכת ההצללה הפנימית בחלון זה ולהנות מאור טבעי ומבט כלפי חוץ. פיתרון זה יעיל במיוחד בחזית הדרומית, שם רצוי גם להשלים אותו עם מדפים אנכיים בצידי החלון. חלונות הפונים לכיוונים מזרח או מערב יהיו חשופים לשמש נמוכה, ולכן יש צורך במערכות הצללה חיצוניות נוספות בסמוך לבסיס הפתח התחתון, כמו וילון גלילה הנאסף כלפי למטה. השלמת מערכת ההצללה החיצונית עשויה לאפשר את השארת מערכת ההצללה הפנימית פתוחה, ובכך להכניס אור טבעי מפוזר ולשמור על מבט החוצה מבעד לחלקו העליון של הפתח התחתון (מתחת למדף האור).

ישנו יתרון מסוים למדף אשר צדו החיצוני נוטה מעט מעלה בכדי לכוון את החזר האור יותר לעומק תקרת המשרד (במיוחד בשעות בהן השמש היא באמצע הרקיע). ישנו יתרון גם למדף בעל פרופיל קעור (כלפי מעלה) בשל יכולתו לרכז את קרינת השמש ולכוון אותה דרך הפתח אל התקרה בעומק המשרד).



דוגמה למדף אור חיצוני: בי"ס צין, מדרשת בן גוריון



מדף אור פנימי



דוגמא למדף אור פנימי [10]

המדף הפנימי מפחית את קרינת השמש הישירה המגיעה מהפתח העליון אל סביבת העבודה ובכך מקטין את ההסתברות לסינוור ואת עומס החום על העובדים. בדרך כלל עומקו של מדף זה אינו מאפשר חסימה מלאה של קרינת השמש הישירה כאשר זוויות השמש נמוכות, ולכן יש צורך גם באמצעי הצללה וניתוב אור נוספים ליד הפתח העליון. ישנו יתרון מסוים למדף פנימי בעל פרופיל קמור (כלפי מעלה) בשל יכולתו לפזר אור לשטח רחב יותר של התקרה, ובכך לאפשר תאורה טבעית אחידה יותר במשרד.

תכנון מדפי האור

מומלץ כי גימור מדפי האור יהיה בעל צבע בהיר ורפלקטיבי בכדי לאפשר החזרת אור מרבית. על מנת שהגימור ישמר לאורך זמן, יש לאפשר גישה אל המדפים לצורך ניקיון תקופתי: היעילות של מדף אשר מכוסה באבק עלולה לרדת במידה ניכרת – 20% ויותר – בהשוואה למדף נקי לחלוטין.

רצוי להשאיר מרווח של מספר סנטימטרים בין השפה הפנימית של מדף האור לבין מסגרת החלון, על מנת לאפשר ניקוז מי גשמים או מים המשמשים לשטיפה וניקוי של המדף, ולהתקין אף מים.

במידת האפשר, יש להבטיח כי מדפי האור, הן הפנימי והן החיצוני, ימשכו מעבר לרוחב הפתח, בכדי לאפשר הצללה ולהפחית את הסינוור בשעות בהן קרינת השמש מגיעה בזווית (אופקית) גדולה ביחס למישור החלון (למשל: בבוקר ואחה"צ בחזית הדרומית).

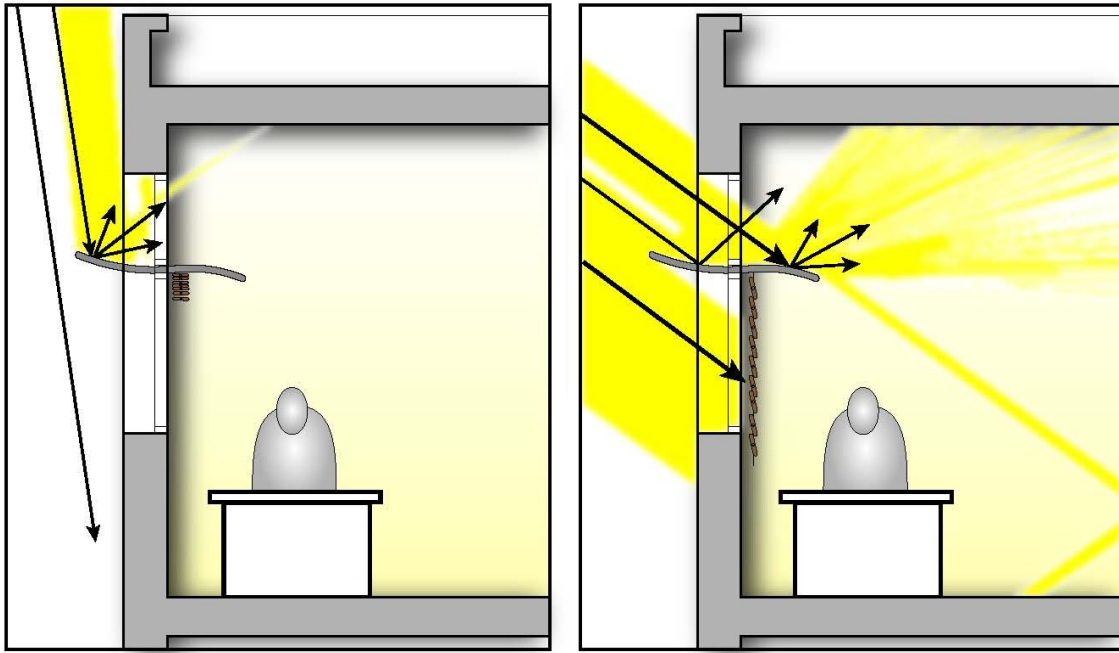
השימוש במדף אור יעיל במיוחד בכיוון דרום, ובמידה מעט פחותה גם במזרח ובמערב. אולם מדף אור יכול לתרום גם בחזית צפונית, אם כי



דוגמא למדף אור חיצוני משוכלל [11]

במידה פחותה מאד מאשר בכיוונים אחרים. מדף אור רפלקטיבי במיוחד עשוי לאפשר רווח אור מסוים גם כתוצאה מניתוב האור המפוזר מהרקיע לעבר תקרת המשרד. עם זאת, יעילותו של מדף האור בניתוב אור מפוזר קטנה מיעילותו בהכוונת קרינה כיוונית, ולכן הכדאיות הכלכלית בהתקנת מדפי אור בחזית הצפונית אינה ודאית.





בחלון דרומי, מדף אור עשוי לתת הגנה מספקת בפני קרינת שמש ישירה בקיץ (משמאל). בחורף, כאשר השמש נמוכה, יהיה צורך גם בהצללה פנימית כגון תריס ונציאני (מימין). בחלונות בחזית המזרחית או המערבית יהיה צורך באמצעי הצללה נוסף למדף האור בכל עונות השנה.



במכונים לחקר המדבר בקמפוס שדה בוקר של אוניברסיטת בן גוריון נערכו ניסויים במדף אור אשר הותקן על גבי חלון בבניין קיים. המתקן כלל מדף פנימי (מימין) ומדף חיצוני (משמאל) אשר הותקנו על אותו חלון.

בכדי להקטין את עומס החום, לצמצם את הסתברות לסינוור, ולהגדיל את עוצמת ההארה בעומק החלל מומלץ כי מאפיינים שונים של הפתח כגון גודלו, עומק מדף האור, הזווית שלו ומידת הרפלקטיביות יקבעו באמצעות הדמיות תאורה טבעית ממוחשבות.





דוגמאות למדפי תאורה בבנייני משרדים

למעלה: בניין משרדים של ממשלת ארה"ב באוקלהומה סיטי. למטה מימין: פרט של מדפי התאורה בחלונות הבניין באוקלהומה סיטי. למטה משמאל: מדף תאורה פנימי בבניין המשרדים הירוק של חברת אינטל בחיפה (בזמן ההקמה).

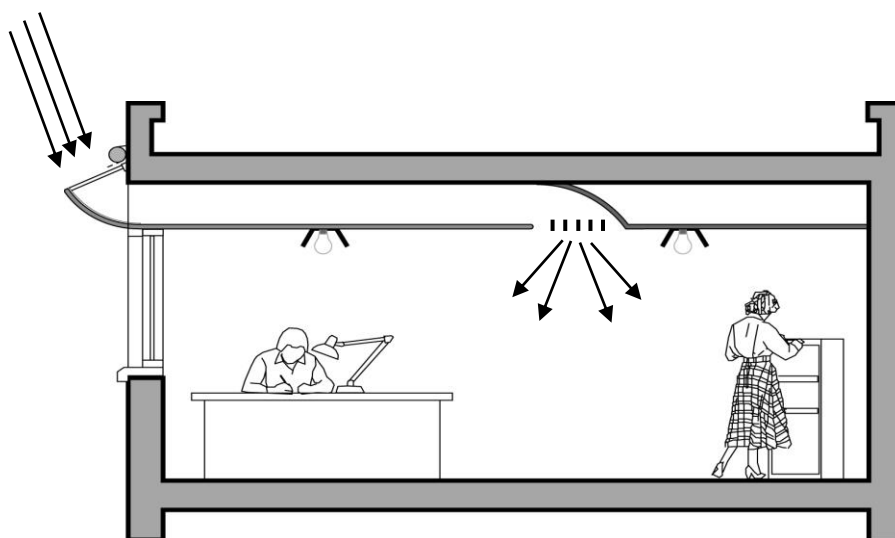


6.7 אמצעים נוספים לניתוב אור

בשנים האחרונות פותחו אמצעים נוספים לניתוב אור לתוך המשרד. חלקם כבר קיימים גם כמוצרים מסחריים, אולם מרביתם עדיין נמצאים בשלבי פיתוח, או שמחירם גבוה מאוד. התיאור המובא להלן הוא תמציתי, אפוא, ומיועד לתת סקירה כללית בלבד.

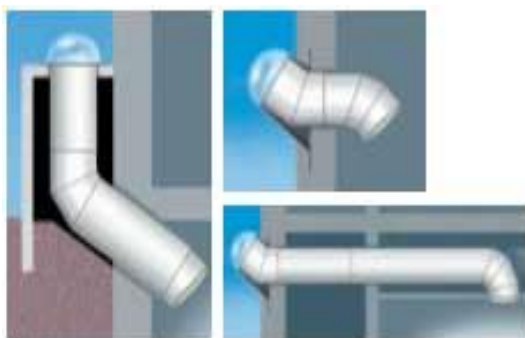
תעלת אור

תעלת אור (light duct) הינה מבנה בעל דפנות רפלקטיביות המנתב אור מפתח בחלקה העליון של חזית המשרד לעבר חלקו הפנימי של החלל הסמוך. תעלת האור עשויה להיות מותקנת בין התקרה האקוסטית לתקרה הקונסטרוקטיבית (בדומה לתעלות מיזוג אוויר). תעלת אור כוללת שלושה רכיבים עיקריים: פתח מזוגג אשר קולט את אור היום; תעלה אטומה לאוויר (ולאבק!) בעלת דפנות רפלקטיביות לניתוב האור אל עומק החלל; ומפזר אשר בעדו מוחדר האור אל החדר. המפזר עשוי להיות מעוצב בדומה לגוף תאורה חשמלי ולהשתלב בתקרה התלויה. יתרונה של תעלת האור הוא ביכולתה לנתב את האור לכל נקודה רצויה בחדר, בלי להשפיע על עוצמת ההארה באזורים הקרובים יותר לחלון. עם זאת, ניתוב האור בתעלה כרוך בהפסדים, אשר עלולים לגדול עם הזמן אם דפנות התעלה יצברו אבק.



תעלת אור

צינור אור



צינור אור (Solar tube) הינו צינור רפלקטיבי במיוחד המאפשר ניתוב אור מחוץ לבניין לחלל המשרד. רפלקטיביות גבוהה במיוחד של הצינור מאפשרת גמישות מסוימת בקביעת זוויות הפיתול של הצינור ללא איבוד משמעותי של אור בהחזרי האור בדפנות. בשני צידי הצינור ממוקמות כיפות: האחת מאפשרת ניתוב האור מהסביבה החיצונית לתוך הצינור, והשנייה פיזורו בחלל המשרד. השימוש הנפוץ בצינור אור הוא להכנסת אור מהגג באופן אנכי דרך חלל הגג לקומה הראשונה, אולם

צינור אור [12]



יתכן ואלמנט זה יוכל לספק הארה משמעותית גם בהתקנה אופקית, בדומה לתעלת האור.

זיגוג מנתב אור

בזכוכית שטוחה מהסוג המשמש לזיגוג חלונות, קרני האור אינן משנות את כיווןן כתוצאה מן המעבר דרך לוח הזיגוג (אם כי ישנה שבירה של הקרניים הן בכניסה אל הזכוכית והן ביציאה ממנה). ניתן לשנות את כיוון האור באמצעות זיגוג בעל חתך אשר בצדו הפנימי (יציאת האור) ישנן שיניים פריזמתיות, או באמצעות יריעה שקופה דקה אשר מוטבעת בה הולוגרמה ואשר מוצמדת לזיגוג רגיל. שתי הטכנולוגיות הן עדיין נסיוניות, וסובלות מחסרונות אשר מונעים בשלב הזה את יישומן בבניינים. ראוי לציין גם כי זיגוג מנתב אור איננו מאפשר מבט דרכו, ולכן השימוש בטכנולוגיה זו מתאים בעיקר לפתח העליון, מכיוון שזה אינו נועד לאפשר מבט אל הסביבה החיצונית אלא להארה בלבד.

זיגוג בעל תכונות אופטיות משתנות

מערכות זיגוג בשלבי פיתוח שונים מסוגלות לשנות את התכונות האופטיות שלהן כאשר מועבר בהן מתח חשמלי (זיגוג אלקטרו-כרומי), כאשר הטמפרטורה שלהן משתנה (זיגוג תרמו-כרומי) או כאשר הן נחשפות לאור בעוצמות שונות (זיגוג פוטו-כרומי). טכנולוגיות אלו נועדו בעיקר להצללה או למתן פרטיות, אולם הן מאפשרות גם שליטה מסוימת בכמות ובפיזור של האור הטבעי.

6.8 מאפייני המשרד

איכות התאורה הטבעית במשרד תלויה לא רק באור המסופק באמצעות הפתחים בחזית, אלא גם במאפיינים שונים של החלל הפנימי עצמו.

מספר כיווני אור

פתחי אור בשתי חזיתות או יותר מאפשרים פיזור טוב יותר של האור הטבעי במשרד. כמו כן, כאשר האור מגיע ממספר כיוונים, הצל המוטל על ידי עצמים הנמצאים במסלול קרני האור, כגון ידי האדם או מסך המחשב, נעשה מטושטש וההבדלים בעוצמת ההארה בין כתמי אור וצל קטנים.

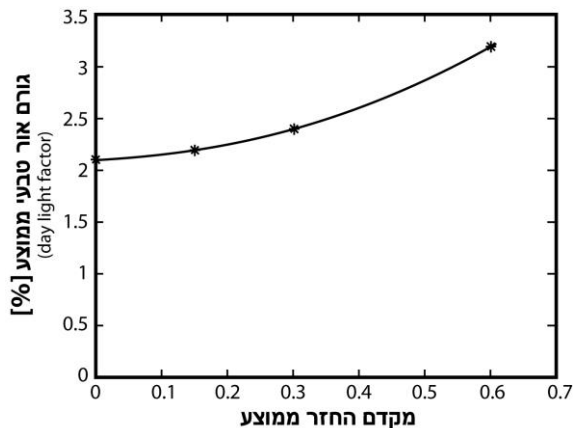
בנוסף לתרומתם של חלונות במספר קירות לתאורה הטבעית, הם עשויים גם לתרום לאזורור מפולש של החלל, אם הם ניתנים לפתיחה.

תקרה

רצוי כי תקרת המשרד תהיה משופעת כלפי מעלה בכיוון החלון, על מנת לשפר את פיזור האור הטבעי המוחזר ממנה. תכנון מתאים של המערכות המותקנות מעל התקרה התלויה, כגון הימנעות מהתקנת תעלות מיזוג אוויר קרוב לקיר החיצוני, יאפשר להתקין תקרה משופעת בלא שיהיה צורך בהגדלת הגובה הקונסטרוקטיבי של הקומה. השילוב של תקרה משופעת וחלונות גבוהים יותר עשוי אפוא לשפר את התאורה הטבעית גם בעומק הבניין ללא הגדלה משמעותית בעלות הבניין הנובעת מתכנון קומות גבוהות יותר.



צבע וגימור פנימי



תקרה וקירות בהירים יאפשרו פיזור טוב יותר של האור בעומק המשרד [13]

גימור בעל צבע בהיר מט, בקירות הניצבים לחזית ובמיוחד בתקרה, יאפשר עוצמת תאורה טבעית גבוהה יותר בעומק החלל (עקב הגדלת החזרי האור בחלל המשרד), וכתוצאה מכך גם יקטין את ניגודי הבהיקות בחלל המשרד ואת ההסתברות לסינוור. מאותו טעם רצוי גם כי פני הקיר אשר בו מותקנים החלונות יהיו בהירים. לצורך גיוון ויצירת גירוי ויזואלי, ניתן לשלב צבע כהה בעיטורים או על ידי הדגשת אלמנטים אדריכליים בעלי שטח מצומצם או צר, ללא הורדה משמעותית של עוצמת ההארה הטבעית בחלל המשרד או תרומה משמעותית להיווצרות ניגודי בהיקות.

מחיצות וריהוט

מחיצות המותקנות בין החלונות לבין עמדת העבודה עלולות להקטין במידה ניכרת את עוצמת ההארה הטבעית. מומלץ לתכנן את מיקום עמדות העבודה והמחיצות כך שלא יחצצו בין סביבת העבודה לפתחי הבניין. כאשר חלל המשרד מחולק לתאים קטנים (cubicles) ניתן לשפר את ההארה הטבעית בשולחן העבודה על ידי ניתוב אור בעזרת מדף אור בתוספת אלמנטים מחזירי אור המשולבים בתקרה האקוסטית. רצוי שהמחיצות והרהיטים העיקריים יהיו בהירים: ריהוט או עצמים כהים אחרים יקטינו במידה ניכרת את החזרי האור ובהתאם לכך את עוצמת ההארה הטבעית על גבי שולחן העבודה. עם זאת, יש להימנע משימוש בחומרים מבריקים אשר עלולים לגרום לסינוור על ידי החזרות לא מבוקרות של קרני השמש או של גופי התאורה המלאכותית.

מסך המחשב

מרבית העבודה במשרדים כיום נעזרת במחשב. לתכנון מסך המחשב ישנה השפעה רבה על הנוחות היוזואלית של העובד. על מנת להימנע מהשתקפויות – העלולות להיגרם מגופי התאורה המלאכותית כמו גם מאור טבעי – רצוי כי המסך יהיה בעל רפלקטיביות נמוכה ובהיקות גבוהה. ככל שהמסך בהיר יותר (ניתן לווסת את הבהירות – brightness), כך ייראו עליו פחות השתקפויות. רוב המסכים השטוחים (LCD) העצמאיים הם בעלי רפלקטיביות נמוכה יותר ממסכי ה-CRT מן הדור הקודם, ולכן פחות חשופים להשתקפויות. עם זאת, המסכים המותקנים במחשבים ניידים הם לעיתים קרובות דוקא מבריקים – ולכן רגישים במיוחד לתנאי ההארה במשרד.

הבהיקות של מרבית מסכי המחשב מסוג LCD היא $250-300 \text{ cd/m}^2$, בהיקות המתאימה לעבודה כאשר עוצמת ההארה במשרד אינה גבוהה מדי. כאשר המשרד חשוך, יש להקטין את בהירות המסך. ככל שמרחק העיניים מן המסך קטן, יש להפחית את הבהירות שלו.

ראוי להקדיש תשומת לב גם למסגרת המסך: יש להימנע ממסגרות העשויות חומרים מבריקים, העלולים להיות מקור להחזרות אור ולסינוור. מומלץ כי המסגרת תהיה צרה ככל האפשר ובעלת גוון ניטרלי.

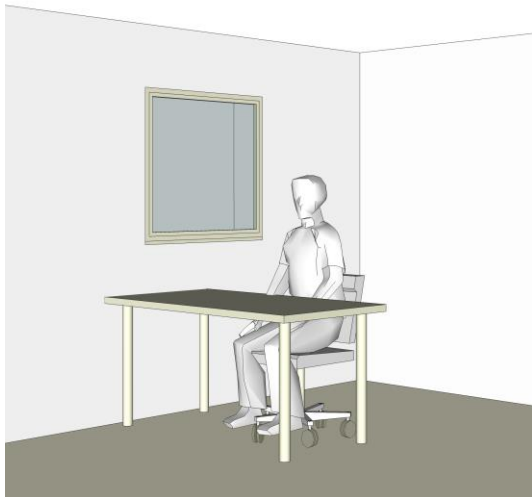


מיקום עמדת העבודה

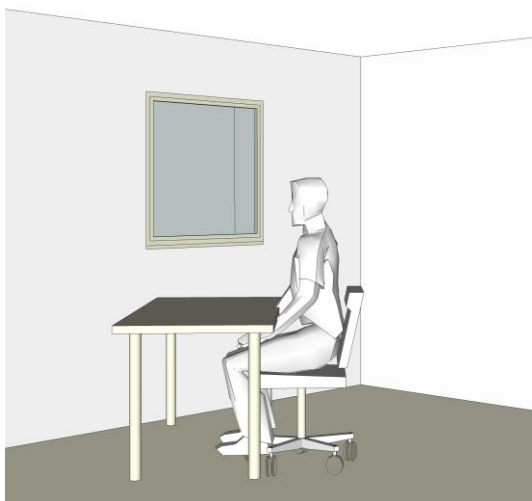
כאשר עמדת העבודה ממוקמת קרוב לחלון, היא עלולה להיות חשופה לשינויים גדולים בעוצמת ההארה ולניגודי בהיקות במרחב הראייה של העובד במהלך היום. אף שהתאורה המשתנה יוצרת לעיתים קרובות סינוור ותנאי עבודה לא נוחים, מסתבר שמרבית העובדים מעדיפים בכל זאת לשבת קרוב לחלון. ניתן להפחית את ההפרעה החזותית ולשפר את סביבת העבודה על ידי העמדה נכונה של השולחן ושל מסך המחשב ביחס לחלון.

בין אם מדובר במשרדים אישיים או בחללים פתוחים המשמשים מספר עובדים, רצוי למקם את עמדות העבודה במרחק מסוים מן הקיר החיצוני בו נמצא החלון, באזור שבו עוצמת ההארה נמוכה יותר והשינויים פחות קיצוניים: עוצמת ההארה פוחתת בקצב מהיר כאשר המרחק מהחלון גדל. עם זאת, במקרים רבים תכנון המשרד איננו מאפשר לקבוע מעבר סמוך לקיר החיצוני, מטעמים של ניצול יעיל של השטח או מכל סיבה אחרת.

להפנייה של עמדת העבודה ביחס לחלון השפעה רבה על הנוחות היוזאלית וההסתברות לסינוור:

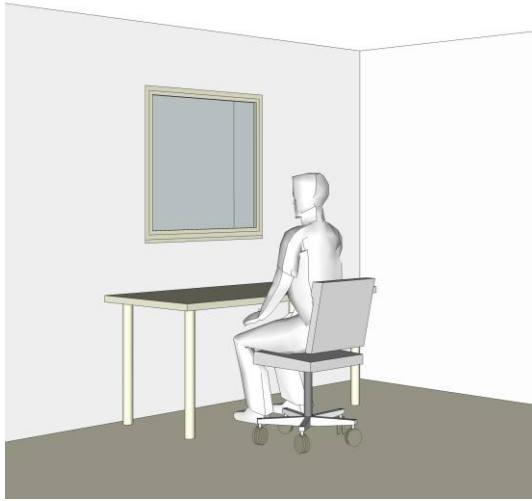


עמדת עבודה הנמצאת בניצב לחלון מאפשרת הארה טובה של סביבת העבודה, בתנאי שהיא מקבלת אור מפוזר בלבד והמסך הינו מסך בעל רפלקטיביות נמוכה ובהיקות גבוהה. אם בנוסף למחשב מיועד השולחן גם לכתיבה, מומלץ כי החלון יהיה בצד הנגדי ליד המחזיקה בעט, בכדי שהצל שמשיליה היד עצמה לא יפריע לכתיבה.

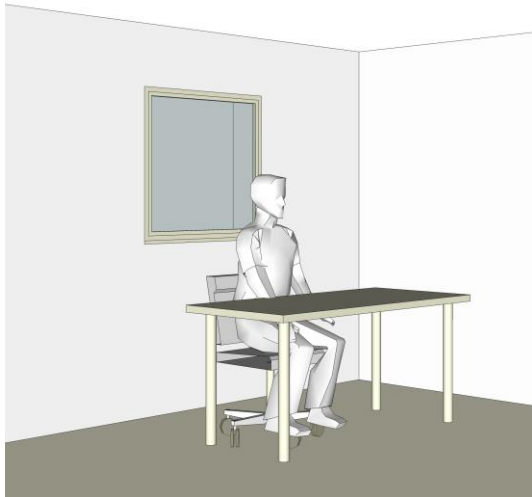


עמדת עבודה הנמצאת באלכסון לחלון ופונה חלקית אליו עלולה לסבול מהארה בעייתית בשל ניגודי בהיקות בין מסך מחשב והנוף הנשקף דרך החלון, אשר אף הוא נמצא בשדה הראייה. רצוי כי אמצעי ההצללה החיצוניים ימנעו חדירת שמש ישירה דרך החלון, בהתאם לכיוון החזית. ניתן לצמצם עוד את ניגודי הבהיקות באמצעות זיוג כהה או וילונות שקופים למחצה. רצוי שההארה הטבעית תהיה מבוססת על אור מפוזר בלבד.





עמדת עבודה הפונה אל החלון סובלת מהארה בעייתית במיוחד בשל ניגודי הבהיקות בין מסך המחשב לבין הנוף הנשקף דרך החלון. מצב זה מאמץ את העיניים ומעיף אותן. אם שולחן העבודה בהיר, או עם מונחים עליו חפצים בהירים, יתכן סינוור בשל החזרי אור המגיע מהחלון. אם קרינת שמש ישירה חודרת מבעד לחלון הסיכויים לסינוור גדולים מאוד, בין כתוצאה מפגיעת קרני שמש בעיניים ובין כתוצאה מניגודי בהיקות גדולים במיוחד. גם אם מותקנים אמצעי הצללה פנימיים יש להקפיד שאלו לא יגרמו לסינוור בשל אור העובר דרכם (במידה והם שקופים למחצה או אם אינם מאפשרות כיסוי מקסימאלי של החלון) או בשל החזרי אור בין אלמנטי הצללה (כפי שקורה בתריסים ונציאניים בהירים).



עמדת עבודה הנמצאת במקביל לחלון כאשר החלון נמצא מאחורי העובד אינה סובלת מניגודי בהיקות, אולם הצל של העובד המוטל על שולחן העבודה עלול לגרום להפרעה. קרני שמש הפוגעות במסך בצורה ישירה או כתוצאה מהחזרה מעצמים מבריקים בחדר עלולות לגרום להשתקפויות במסך המחשב ולהיווצרות סינוור ליקוי, במיוחד אם הוא רפלקטבי.



7. שילוב תאורה טבעית וחשמלית להשגת חיסכון באנרגיה

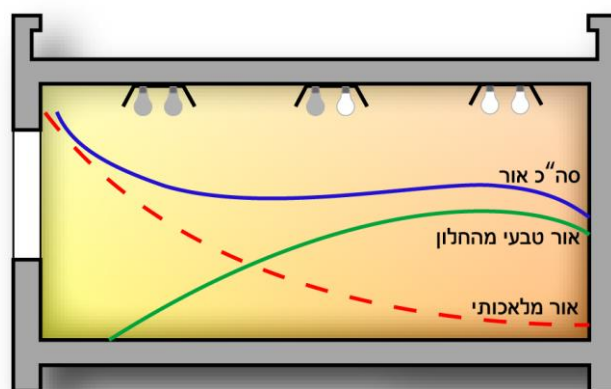
השימוש בתאורה טבעית מאפשר להשיג חיסכון ניכר בצריכת האנרגיה הנדרשת בהפעלת תאורה מלאכותית, אולם ללא תכנון נכון של מעגלי התאורה המלאכותית, חישני האור, ומערכות בקרת האור היקף החיסכון בפועל עלול להיפגע. מערכות אלו דורשות גם תפעול נכון על ידי העובדים ותחזוקה מתאימה.

7.1 מעגלי תאורה

בכדי להשיג ניצול מיטבי של התאורה המלאכותית, רצוי לתכנן אותה כך שניתן יהיה להפעיל את גופי התאורה באופן מדורג רק באזורים בהם קיים צורך בתוספת תאורה. לשם כך יש חלק את גופי התאורה למספר מעגלי בקרה. תכנון החלוקה למעגלי תאורה מושפע הן מהחלוקה של החלל לאזורים בהם אופי הפעילות שונה (למשל – עמדת עבודה מול מחשב או שולחן לפגישות) והן בהתחשב בעוצמת ההארה הטבעית הקיימת בחדר.

באופן טבעי עוצמת ההארה הטבעית בחדר יורדת ככל שמתרחקים מהחלון. לכן רצוי לחלק את גופי התאורה ל-2-3 מעגלי בקרה, בדרך כלל במקביל לחלונות. כך ניתן יהיה להפעיל את גופי התאורה בעומק החלל בלבד כאשר עוצמת ההארה הטבעית סמוך לחלונות מספקת. חשוב לזכור כי הפעלת כל גופי התאורה בו זמנית, גם כאשר סמוך לחלון יש די אור, עשויה אמנם להבטיח כי עוצמת ההארה על משטח העבודה תהיה גבוהה מספיק - אך אינה מבטיחה כי בחלל לא ישארו ניגודי בהיקות העלולים לגרום לסינוור.

בנוסף לחלוקה של הבקרה על גופי התאורה בהתאם למרחק מן החלון יש להביא בחשבון גם חלוקה לפי סוג הפעילות ואף לפי החלוקה לעמדות עבודה פרטניות. חשוב להותיר בידי כל אחד מן העובדים אפשרות לכוון את עוצמת ההארה בהתאם להעדפה האישית. בקרה אישית על התאורה במרחב העבודה תמנע הפעלת גופי תאורה שלא לצורך גם כאשר חלק מן המשרד אינו פעיל. תכנון מעגלי הארה נפרדים לעמדות עבודה ממוחשבות ולאזורי פגישות יאפשר הפעלת התאורה המלאכותית באזורי הפגישות רק כאשר אלו בשימוש.



הפעלת גופי תאורה תיעשה באופן מדורג בהתאם למרחק מהחלון.

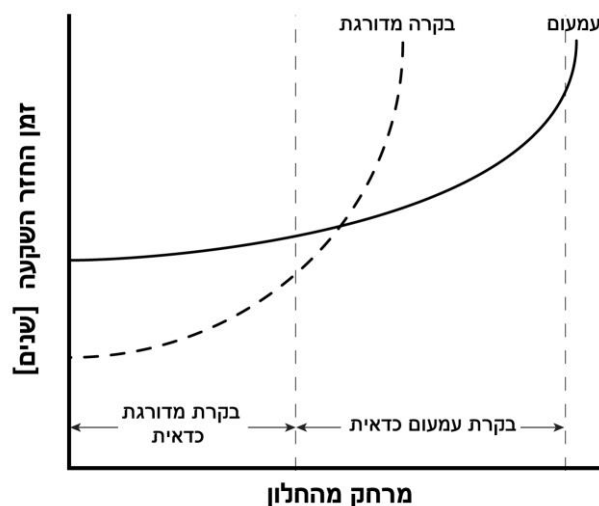
למיקום מפסקי התאורה עשויה להיות השפעה רבה על דפוסי השימוש בהם. מקובל כי כל המפסקים מרוכזים ליד דלת הכניסה לחלל – מיקום הנגזר מדרישות בטיחות אך גם מנוחיות ההתקנה. עם זאת,



מיקום מפסקי התאורה בסמוך לעמדות העבודה במקום בסמוך לדלת יגדיל את ההסתברות שהעובדים יפעילו את המעגלים בהתאם לצורך, ולא כפעולה אוטומטית אשר עורכים בעת הכניסה למשרד. לשם כך יש לתכנן מראש גם את מיקום עמדות העבודה, או להבטיח כי ניתן יהיה בעתיד להביא את מערכת הפיקוד החשמלית לכל מיקום באמצעות רצפה צפה (למשל). כמו כן ניתן לעשות שימוש במפסקים 'חכמים' או בפיקוד באמצעות שלט רחוק.

7.2 ויסות עוצמת התאורה

בנוסף לחלוקת גופי התאורה במשרד למספר מעגלי בקרה, או במקרים בהם לא ניתן לבצע חלוקה כזאת, ניתן לצמצם את הפעלת התאורה החשמלית על ידי התקנת עמעמים אשר יאפשרו לווסות את עוצמת ההארה המלאכותית באופן רציף בהתאם לשינויים בעוצמת ההארה הטבעית. לכאורה עמעמים עדיפים תמיד על פני בקרים אשר מכבים או מדליקים את המנורות אך אינם מווסתים את עוצמתם (בקרת on-off), אולם מחירם הגבוה יותר והעובדה כי לא כל סוגי המנורות ניתנים לעמעום מייקרת שיטת בקרה זו במידה ניכרת. מאחר ועוצמת ההארה בקדמת המשרד, קרוב לחלונות, כמעט תמיד מספיקה בשעות היום, אין צורך להתקין בה עמעמים וניתן להסתפק בבקרת on-off. לעומת זאת, בעומק החלל ישנה עדיפות לעמעמים, משום שלעיתים קרובות יש בו צורך בהגברת התאורה בלבד, כתוספת לתאורה הטבעית ולא כתחליף לה.



בחלל עמוק או במרחק גדול מהחלון, ישנה עדיפות לבקרת גופי התאורה באמצעות עמעמים^[14]

7.3 חיישנים לבקרת התאורה המלאכותית

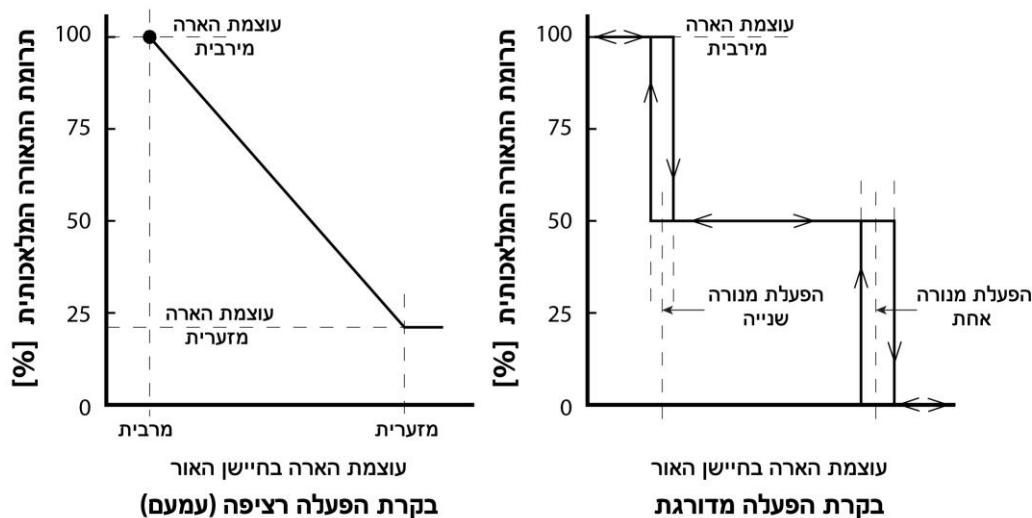
בקרה אוטומטית של התאורה המלאכותית דורשת חיישנים אשר באמצעותם ניתן לווסת את פעולת גופי התאורה בהתאם לעוצמת ההארה הטבעית ובתנאי שינם עובדים במשרד.



חיישני נוכחות הם אמצעי פשוט ונפוץ לחיסכון באנרגיה הדרושה להפעלת מערכות רבות בבניינים, כגון מיזוג אוויר או תאורה. חיישני אור, הכוללים תאים פוטו-אלקטריים, נפוצים פחות. אף כי התקנתם פשוטה מבחינה טכנית, השימוש בהם בעייתי משום שבדרך כלל לא ניתן להתקין אותם על גבי משטח העבודה, ובודאי שלא ניתן למקם אותם קרוב לעיני העובד, שם התועלת שבהם עשויה להיות מרבית.

מקובל להתקין את חיישני האור בתקרה מעל עמדות העבודה, כשהם מוגנים מפני קרינת שמש ישירה המגיעה מהפתחים. ניתן גם למקם חיישני אור במקומות אחרים כגון אדן החלון או אף מחוץ לו, אולם ככל שהם רחוקים יותר ממרחב העבודה התועלת שבהם פחותה: גם אם ניתן לכייל אותם כך שיביאו להפעלת מערכת התאורה בתנאים מוגדרים בסביבת העבודה, קיים חשש כי פעולתה של מערכת התאורה המלאכותית לא תגיב בצורה מדויקת לשינויים המתרחשים בפועל בעוצמת ההארה על גבי שולחן העבודה עצמו. שינויים אלה עלולים להיות תוצאה של הבדלים בכמות האור הטבעי החודרת מבעד לחלון, אך גם של שינויים בסידור הריהוט בחדר או אף לצורת ההעמדה של המחשב על גבי השולחן.

מערכות הבקרה עשויות לשלוט בתאורה החשמלית באופן ישיר ומלא (closed system), אולם רצוי כי יאפשרו גם התערבות על ידי המשתמש (open system). הסוג השני מאפשר גמישות רבה יותר בהפעלה, וניתן גם לשלב בה מערכת ממוחשבת אשר מביאה בחשבון מספר רב של גורמים המשפיעים על צריכת האנרגיה בבניין, בנוסף לעוצמת ההארה בנקודה מסוימת. להפעלה על ידי המשתמש ישנו גם יתרון פסיכולוגי: עצם הידיעה כי ניתן לשלוט על התאורה מגדילה את שביעות הרצון מהתנאים, בעוד שמערכת אוטומטית עלולה ליצור אי-שביעות רצון מובנית.



**בקרת התאורה יכולה להתבצע באופן רציף (משמאל) או במדרגות
 קבועות מראש (מימין) [15]**



8. התייחסות לדרישות סביבתיות אחרות

אחד התפקידים העיקרים של החלונות במשרדים הינו הכנסת תאורה טבעית, אולם לפתחים בבניין ישנם גם יעודים אחרים, כגון מתן מבט אל הסביבה או אוורור טבעי. מדריך זה אמנם מתמקד בתכנון התאורה הטבעית, אולם מכיוון שללא התייחסות לכל תפקידי החלון תכנון הפתחים עלול להיות לקוי, פרק זה מתייחס בקצרה גם לנושאים נוספים.

חשוב לציין בהקשר הזה כי החלון הוא אלמנט אשר עשוי לתרום רבות לתפקוד הבניין, אולם באותה עת הוא גם מהווה נקודת תורפה במעטפת, אשר דורשת הקפדה יתרה בהתייחסות לתפקוד התרמי והאקוסטי שלו.

8.1 מבט אל הסביבה החיצונית

אחד התפקידים העיקריים של פתחי הבניין, ואולי אף המשמעותי ביניהם, הוא מתן מבט אל הסביבה החיצונית. המבט החוצה משפיע באופן חיובי על העובד (מבחינה פסיכולוגית) ויוצר תחושה כללית של רווחה אשר חסרה מאוד בחללים אטומים. קשר ויזואלי עם הסביבה מפחית את הרגשת הניתוק ממנה, מאפשר מנוחה קלה בשל היסח הדעת מן העבודה המשרדית ויוצר חשיפה לגירויים דינמיים מעוררים. המבט החוצה אף מאפשר מנוחה לאישונים על ידי מתן אפשרות לשינוי המיקוד ממיקוד קצר-טווח (המאפיין עבודה משרדית) למיקוד ארוך-טווח (המאפיין מבט אל הנוף). נמצא כי לטיב הנוף השפעה על שביעות רצון העובדים: הנוף המועדף הינו נוף עשיר בפרטים, אסתטי, ובו מוקדי פעילות, בין אם מדובר בנוף טבעי או בנוף עירוני מעוצב על ידי האדם. מכיוון שמבט לסביבה הינו גורם חשוב בתכנון המשרד הוא הפך גם לביטוי של מעמד העובד, של תנאי העסקתו ושל איכות סביבת העבודה שלו.

8.2 אוורור טבעי

החלוקה של החלון המומלצת במדריך זה, לחלק תחתון המיועד למבט החוצה ולפתח עליון שיעודו העיקרי הוא תאורה טבעית, מאפשרת גם פיתרון יעיל לאוורור טבעי. אם שני חלקי החלון ניתנים לפתיחה בנפרד, האוורור הטבעי עשוי להיות יעיל במיוחד מכמה טעמים:

א. פתיחה של החלון העליון (בלבד) מאפשרת זרימת אוויר אל עומק החלל, ללא הפרעה של ריהוט או מחיצות נמוכות.

ב. פתיחה של החלון העליון איננה כרוכה בהפרעה פיסית למרחב הסמוך, כפי שקורה כאשר פותחים חלון הנפתח פנימה באזור שולחן העבודה.

ג. פתיחה של החלון העליון, שהוא בדרך כלל צר מכדי לאפשר חדירה על ידי בני אדם, מאפשרת להפעיל אוורור לילה ללא חשיפה לבעיות אבטחה.

ד. פתיחה של חלון עליון מאפשרת אוורור ללא הפרעה העלולה להיגרם על ידי מהירות רוח גבוהה במידה לא רצויה, כפי שעלול לקרות בעת פתיחת חלון בגובה השולחן.

ה. כאשר שני חלקי החלון פתוחים, עשוי להיווצר אוורור מפולש: בעוד שהאוויר החם יפלט מבעד לפתח העליון, אוויר חיצוני טרי יכנס מבעד לפתח התחתון.

חשוב לזכור כי איכות האוורור תלויה בגורמים נוספים רבים, כגון השפעתם של אמצעי ההצללה (הן הפנימית ובמיוחד החיצונית) על זרימת האוויר, סוג הפתיחה ומיקום החלון במעטפת הבניין.



8.3 מתן הגנה אקוסטית

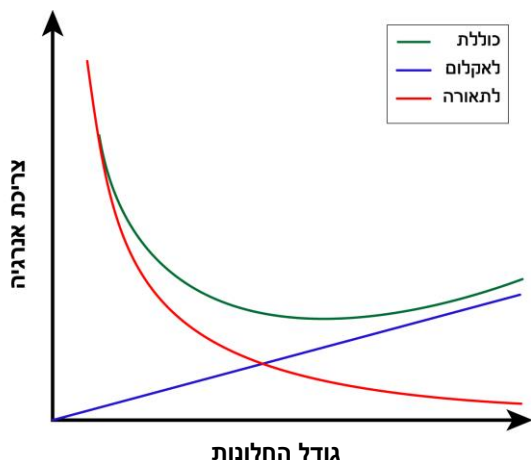
חלונות, ביחוד כאלה הניתנים לפתיחה, הם נקודת תורפה במעטפת האקוסטית של הבניין. עם זאת, התכונות האופטיות של הזיגוג אינן משפיעות בדרך כלל על תפקודו האקוסטי. יש להביא בחשבון שהפיתרונות המקובלים להפחתת מעבר רעש – זיגוג כפול או זכוכית שכבות משולשת (triplex) - מפחיתים מעט את מעבר האור דרך החלון, משום שכל שכבת זיגוג (שקופה!) בולעת כ-10% 6- מקרינת השמש, בהתאם לעובי שלה ולכמות הברזל בזכוכית.

לעומת זאת, כאשר ישנם מטרדי רעש משמעותיים, לא ניתן להבטיח אוורור טבעי נאות ללא הפרעה אקוסטית משמעותית. כאשר יש צורך בהגנה אקוסטית בסביבה רועשת במיוחד, יש אפוא צורך באוורור מכני אשר יפעל בשעות שבהן המשרד מאוכלס. פיתרון חלקי לבעייה ניתן למצוא בחזית הכפולה (double façade), אם כי זהו פיתרון יקר מאוד.

הפחתה בעוצמת הקול הנמדדת בתדרים הבינוניים הנגרמת על ידי רכיבי מעטפת שונים בבניין:

הפחתה בעוצמת הקול (db)	רכיב המעטפת	
20	זיגוג 3 מ"מ בכנף נפתחת, ללא אטימה	1
23	זיגוג 3 מ"מ בכנף נפתחת, בתוספת אטימה	2
25	זיגוג כפול 3 מ"מ עם מרווח אוויר בכנף נפתחת, ללא אטימה	3
27	זיגוג 6 מ"מ בכנף נפתחת, ללא אטימה	4
49	חלון כפול, 2 כנפיים כמו (1) במרחק 150 מ"מ, דפנות הפתח מצופות חומר בליעה	5
51	חלון כפול כמו (5), עם שמשות בעובי 6 מ"מ והמרחק בין הכנפיים 200 מ"מ	6
54	קיר בטון מטויח בעובי כולל 225 מ"מ	7
5-10	חלון עם כנף פתוחה חלקית	8
15-25	חלון כפול עם פתיחה מדורגת	9

8.4 הפחתת עומס חום



בישראל, שבה מזג האוויר בהיר כמעט כל ימות השנה, חלק ניכר מהעומס התרמי על הבניין נוצר כתוצאה מחדירה לא מבוקרת של קרינת שמש אל הבניין. הנטייה הרווחת בשנים האחרונות להגדיל את שטחי הזיגוג השקוף בחזיתות הבניינים על חשבון חלקי מעטפת אטומים מגדיל מאוד את העומס על מערכות מיזוג האוויר בעונה החמה. השימוש במערכות זיגוג מורכבות המשלבות זכוכיות מגוונות ('כהות') ורפלקטיביות בהרכבים שונים, עם או בלי ציפויים בעלי פליטות נמוכה (low-e), נותן פיתרון חלקי בלבד לבעייה.

גודל חלונות אופטימלי תלוי בחלק היחסי של

התאורה והאקלום בצריכת האנרגיה של הבניין¹⁶



חשוב לזכור כי החדרת אור טבעי לבניין בהכרח כרוכה גם ברווח אנרגיה אשר איננו תמיד רצוי: ברוב אזורי הארץ, עומסים פנימיים כגון ציוד משרדי ומחשוב עשויים לספק די חום בכדי לחמם בניין משרדים מבודד היטב גם בחורף. הגדלת שטחי הזיגוג מעבר לאופטימום, בין היתר בניסיון להבטיח תאורה טבעית רבה ככל האפשר, עלולה להביא בסופו של דבר לגידול בהוצאות האנרגיה הכוללות של הבניין במקום לחיסכון המבוקש.

חשוב לזכור שעל מנת לקבל עוצמת הארה נאותה הרחק מן החלון, עוצמת ההארה בסמוך אליו תהיה בדרך כלל עודפת. עודף האור מלווה, כאמור, גם בעומס חום אשר הוא לרוב בלתי רצוי, ולכן חשוב להגביל את עומק החלל, או לפחות להגביל את ממדי החלק אשר אותו שואפים להאיר באור טבעי. כאשר עומק המשרד עולה על 5 מטרים, בקירוב, מומלץ לשלב תאורה חשמלית אשר תפעל גם ביום. לא מומלץ לתכנן משרדים אשר עומקם עולה על 8 מטרים.

8.5 חימום פסיבי

באחדים מאזורי הארץ, ובפרט באזור ההר (לרבות ירושלים והגליל), עלולה להיות דרישה לחימום בימות החורף על אף העומסים הפנימיים בבניין אשר מקורם במחשבים וציוד חשמלי אחר, ואף בחום אשר נפלט מן העובדים עצמם. אם הבניין יהיה מבודד היטב, הצורך בחימום נוסף יהיה קטן יחסית, וניתן יהיה להיעזר בקרינת השמש בכדי לספק את רוב האנרגיה הנדרשת.

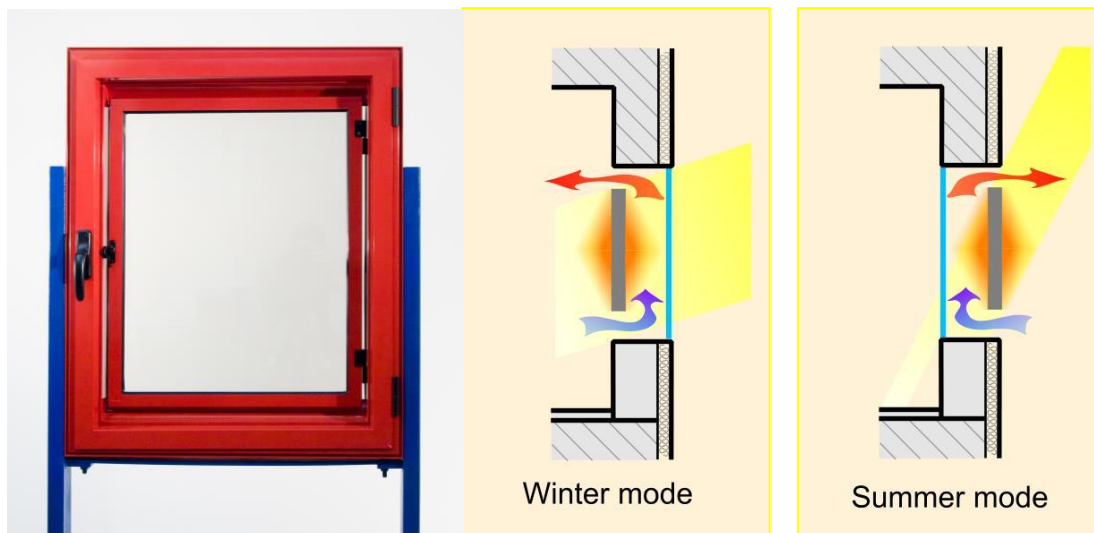
כפי שהודגש במדריך זה, חדירת קרינת שמש ישרה לסביבת העבודה עלולה לפגוע בנוחות היוזואלית ולגרום לסינוור. בכדי להתגבר על קושי זה ולאפשר חימום פסיבי, ניתן להשתמש באמצעי הצללה פנימיים בעלי גוון כהה על מנת לבלוע קרינת שמש זאת, ובהמשך לפלוט אותה בצורת קרינה אינפרא אדומה לחימום המשרד, באופן שאיננו פוגע בנוחות היוזואלית. (עם זאת, חשוב כי אמצעי ההצללה אשר יופעל בחודשי הקיץ יהיה דוקא בעל גוון בהיר, כמקובל, בכדי להקטין את כמות החום הנבלעת בו ולמנוע התחממות יתר.) מומלץ כי מערכת ההצללה תותקן במרחק של סנטימטרים אחדים מהזיגוג, על מנת לאפשר תנועת אוויר אשר תאפשר לחום הנפלט ממנה להתערבב באוויר החדר.

לחלופין, ניתן לנצל חלקים אחרים בחזית הבניין (שאינם בהם חלונות), ולהתקין בהם קיר קולט (Trombe wall) או מערכות אחרות לקליטת שמש ישירה. כמו כן ניתן למקם מבואות או חללים אחרים אשר אינם דורשים נוחות ויזואלית מקסימאלית לכיוון דרום לצורך חימום פסיבי של המשרד כולו.

מערכת זיגוג המאפשרת נוחות ויזואלית ותרמית מבלי להפחית את רווח החום הסולרי פותחה בישראל. עיקרון הפעולה של מערכת הזיגוג מבוסס על המרת אנרגיית שמש קצרת-גל לקרינה ארוכת גל ולחימום האוויר. 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 מגוונת בעלת מקדם בליעה גבוה במיוחד. המרווח שבין שתי היחידות מאוורר באמצעות פתחים בצד התחתון ובצד העליון של הזכוכית המגוונת. 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 בוהק בקרבת החלון ומקטינה מאוד את הנזק העלול להגרם לריהוט וציוד 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.





**חלון עם תפקוד משתנה לפי עונות השנה:
מימין - עיקרון הפעולה של המערכת. משמאל - מימוש מסחרי.**

8.6 שמירה על פרטיות

הצורך בשמירה על פרטיות במשרד, מצד עוברי אורח ברחוב, מצד דיירי הבניינים השכנים או אף מדיירים אחרים באותו בניין הינו גורם נוסף המשפיע על תכנון פתחי הבניין והצללתם, וכתוצאה מכך גם על איכות התאורה הטבעית המתקבלת במשרד. בבניינים רבים מערכת ההצללה הפנימית (כגון וילונות או תריסים ונציאניים) סגורה כל יומות השנה לא בכדי לבקר את כמות האור החודרת פנימה – אלא בכדי להבטיח פרטיות. החלוקה המומלצת במדריך זה, לחלון תחתון המיועד למבט החוצה וחלון עליון המיועד להארה טבעית, מאפשרת להנות מתאורה טבעית נאותה גם כאשר החלק התחתון סגור. מאידך, כאשר ניתן לוותר על הפרטיות למען המבט החוצה, עדיין ניתן להנות מתאורה טובה בתנאי שמערכת ההצללה פתוחה רק כאשר אין חדירה של קרינת שמש ישירה מבעד לפתח.



9. שיקולים כלכליים

שימוש מושכל בתאורה טבעית במשרד מאפשר חיסכון בהפעלת התאורה החשמלית. הצמצום בהפעלת התאורה החשמלית יעשה ידנית או על ידי מערכת בקרה אוטומטית. עם זאת, כפי שהודגש במדריך זה, לא די בהתקנת חלונות גדולים אשר יבטיחו עוצמת הארה גבוהה: ללא אמצעים למניעת סנוור, היעדר נוחות ויזואלית יביא לסגירת חלונות או תריסים, ובעקבות זאת להפעלת התאורה החשמלית.

מכיוון שכיום מערכות התאורה המלאכותית בבנייני משרדים צורכות בין רבע לשליש מכלל האנרגיה הנדרשת להפעלתן, צמצום השימוש בתאורה עשוי להקטין את צריכת האנרגיה במשרד במידה ניכרת. בנוסף לחיסכון בצריכת האנרגיה הישירה הנדרשת להפעלת התאורה המלאכותית, ניצול אור יום מאפשר בעקיפין גם הפחתה של עומס החום (המשתחרר מן הנורות) על מערכת המיזוג, ובהתאם הפחתת צריכת האנרגיה של מערכות הקירור בתקופה החמה.

חשוב לציין כי מאחר ובמרבית אזורי הארץ ההוצאות לחימום בבנייני משרדים קטנות במידה ניכרת מההוצאות למיזוג אוויר, יש להבטיח כי הגדלת החשיפה לאור יום לא תלווה בהגדלת עומס החום באופן שיבטל את החיסכון המתקבל. הנצילות האורית של גופי התאורה החדשים (למעלה מ-90 לומן לואט) מתקרבת כבר לזו של אור השמש, אך יתרונם העיקרי בהשוואה לאור טבעי הוא שניתן למקד אותם כך שתתקבל עוצמת הארה הנדרשת בכל נקודה ונקודה – ולא למעלה מכך. הנצילות של מנורות LED, שהיא גבוהה אף יותר, תביא בעתיד לירידה נוספת בעלות התאורה המלאכותית.

עלות השגת תאורה טבעית משופרת משתנה מפרוייקט לפרוייקט בהתאם למאפייני התכנון הכלליים. לעיתים ניתן להשיג שיפור ניכר ע"י תכנון מושכל בלבד (כגון כיווני הפתחים, וסוג הזיגוג), ולעיתים ישנו צורך בהוצאה כספית נוספת בהתקנת אמצעים נוספים (כגון מערכות הצללה וניתוב אור). במידה ונעשה שימוש באמצעים פשוטים יחסית צפוי כי ההחזר ההוצאה הנוספת יושלם תוך שנים בודדות, באמצעות החיסכון האנרגטי ושיפור יעילות העובדים.

בנוסף לכל האמור לעיל, חשוב להדגיש כי הרווח העיקרי המתקבל מתאורה טבעית טובה בא לידי ביטוי ברווחת העובדים. במרבית בנייני המשרדים, החלק היחסי של מרכיב האנרגיה קטן מאוד ביחס למרכיב השכר, העשוי להוות 90% או יותר מסך ההוצאות. שימוש נכון בתאורה טבעית במשרד משפר משמעותית את יעילות העבודה, את שביעות רצון העובדים ואת בריאותם, ולכן הרווח הכלכלי העיקרי עשוי לבוא דוקא באופן עקיף ע"י הגדלת פריון העבודה. מאידך, אם שימוש בתאורה טבעית לשם חיסכון באנרגיה יגרום לפגיעה בסביבת העבודה, וכתוצאה מכך לירידה בתפוקת העובדים, הרי שהחיסכון הוא חיסכון מדומה.



10. רשימת קריאה

10.1 ספרים נבחרים בעברית

- גוזס ע., אשר א. ונאמן א. 1996. פתחים במבני חינוך: הנחיות תכנון לחלונות ודלתות. המכון לפיתוח מבני חינוך ורווחה, תל אביב, 135 עמ'.
- נאמן א., 2002. תאורה טבעית בבניינים - עקרונות והנחיות תכנון. המשרד התשתיות הלאומיות והטכניון, חיפה. 467 עמ'.
- נאמן א., לנדמן י., ברנד ה. ואייזנשטדט, ש., 2000. פתחים ומעטפת לפרטי פרטים. אנציקלופדיה לאדריכל בע"מ, תל אביב. 208 עמ'.

10.2 ספרים נבחרים באנגלית

- Baker N. and Steemers K., 2002. Daylight Design of Buildings. James and James, London, 250p.
- Baker N., Fanchiotti A. and Steemers K. (eds.), 1993. Daylighting in Architecture – A European Reference Book. James and James, London.
- Boyce, P. (1981). Human Factors in Lighting, Macmillan, New York.
- Carmody J., Selkowitz S., Arasteh D. and Heschong L., 2007. Residential Windows. W. W. Norton, New York, 247p.
- Carmody J., Selkowitz S., Lee S., Arasteh D. and Willmert T., 2004. Window Systems for High Performance Buildings. W. W. Norton, New York, 400p.
- Compagno, A., 1995. Intelligent Glass Facades. Birkhauser, Basel, 184p.
- Egan M. and Olgyay V., 2002. Architectural Lighting. McGraw-Hill, Boston, 436p.
- Evans B., 1981. Daylight in Architecture. McGraw-Hill, New York, 204p.
- Fontoyont, M. (Ed.) 1999. Daylight Performance of Buildings. James and James, London, 304p.
- Helms, R. N., and Belcher, M. C. (1991). Lighting for Energy Efficient Luminous Environments. Prentice Hall, New Jersey.
- Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), 1999. Recommended Practice of Daylighting.
- Johnson T., 1991. Low-E Glazing Design Guide. Butterworth Architecture, Boston, 200p.



- Koster H., 2004. Dynamic Daylighting Architecture. Birkhauser, Basel, 463p.
- Muneer T., Abodahab N., Weir G. and Kubie J., 2000. Windows in Buildings. Architectural Press, Oxford, 258p.
- Olgyay, A., and Olgyay, V. (1957). Design with Climate: Solar Control and Shading Devices, Princeton University Press, New Jersey, 201p.
- Ruck, N. C. (1989). Building Design and Human Performance, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Schittich C. (Ed.) 2003. In Detail: Solar Architecture. Birkhauser, Basel, 176p.

10.3 מדריכים באינטרנט

- Aries, M. 2005. Human Lighting Demands: Healthy Lighting in an Office Environment. <http://alexandria.tue.nl/extra2/200512454.pdf>
- ASHRAE Design Guide: Advanced Energy Design Guide for Small Office Buildings. (P69-80) <http://www.ashrae.org/publications/page/1604>
- Daylight Design Variations Book: TNO-TUE Centre for Building Research. <http://sts.bwk.tue.nl/daylight/varbook/index.htm>
- Daylight in Buildings: A Source Book on Daylighting Systems and Components. Report by IEA SHC Task 21/ ECBCS Annex 29. <http://gaia.lbl.gov/iea21/>
- Daylighting Guide for Canadian Commercial Buildings. <http://www.enermodal.com/Canadian/pdf/DaylightingGuideforCanadianBuildingsFinal6.pdf>
- Energy Design Resources: Daylighting Guidelines. <http://www.energydesignresources.com/Resources/Publications/DesignGuidelines/tabid/73/articleType/ArticleView/articleId/8/Design-Guidelines-Daylighting-Guidelines.aspx>
- European Commission: SynthLight Handbook. <http://new-learn.info/learn/packages/synthlight/handbook/index.html>
- Lawrence Berkeley National Laboratory: Daylighting with Integrated Envelope & Lighting Systems. http://windows.lbl.gov/comm_perf/daylight/esl3.html
- New Buildings Institute: Advanced Lighting Guidelines. <http://www.newbuildings.org/advanced-lighting-guidelines>



- Otis T. and Reinhart C. A Design Sequence for Diffuse Daylighting - Daylighting Rules of Thumb.
<http://www.gsd.harvard.edu/people/faculty/reinhart/documents/DiffuseDaylightingDesignSequenceTutorial.pdf>
- Vogen Horn, A. Daylighting Collaborative: Light every building using the sky. USGBC presentation. <http://www.daylighting.org/usgbc2008presentation.pdf>

10.4 רשימת מקורות של תמונות וגרפיקה במסמך

- 1 European Commission: SynthLight Handbook.
- 2 Baker and Steemers, 2002.
- 3 Leal and Maldonado, 2002
- 4 Mardaljevic J. 1999. Daylight Simulation: Validation, Sky Models and Daylight Coefficients. PhD thesis, De Montfort University.
- 5 <http://squ1.org/wiki>
- 6 Lawrence Berkeley National Laboratory: Tips for Daylighting with Windows
- 7 ת"י 5282, מכון התקנים הישראלי
- 8 ASHRAE Design Guide: Advanced Energy Design Guide for Small Office Buildings
- 9 Koster, 2004.
- 10 <http://www.daylighting.org/usgbc2008presentation.pdf>
- 11 Schittich, 2003
- 12 <http://www.solarspot.it/it>
- 13 <http://sts.bwk.tue.nl/daylight/varbook/reflectie.html>
- 14 European Commission. SynthLight Handbook.
- 15 Heschong Mahone Group: Skylighting guidelines.
- 16 <http://www.learn.londonmet.ac.uk/packages/clear/visual/buildings/elements/index.html>

