

להתקררותה והתקשותה. הזכוכית החמה והרכה מתקדמת על "מצע" של מתכת אבץ נוזלית באמבטיות בעלות טמפרטורות ההולכות וקטנות בהדרגה מתאימה. בדרך זו מתאפשרת בקרה קפדנית של קירור הדרגתי ואחיד. בסוף התהליך, מתקבלת זכוכית בעלת דפנות חלקות ומקבילות, עם איכות אופטית מעולה.

במקביל לזכוכית, משתמשים כיום גם בחומרים פלסטיים שונים למטרות זיגוג. חומרים אלה מתחלקים לשתי קבוצות – האחת בצורת יריעות מפוליאטילן, פוליויניל כלוריד (פי. וי. סי) ועוד, בהן משתמשים בעיקר לקרוי של חממות. לקבוצה השנייה שייכים החומרים הקשיחים והחצי קשיחים - החומרים אקריליים – המכונים גם בשם פרספקס, וכן הפיברגלאס (סיבי זכוכית מוספגים בחומר פלסטי שקוף) והפוליקרבונט.



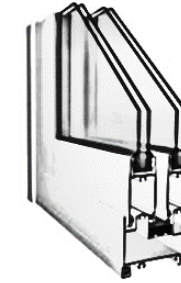
לחומרי הזיגוג הפלסטיים יתרונות רבים. הם ניתנים לעיבוד קל יחסית, ניתן ליצור מהם צורות שונות, ועוד. אולם, הם רגישים לקרינה האולטרה סגולה הגורמת להרס שלהם. כמו כן, הם נשרטים בנקל. כתוצאה מכך משך חיי הזיגוג הפלסטי מוגבל כיום 10- עד 20 שנים לכל היותר. לעומת זאת, הזכוכית יציבה מאוד ושומרת על תכונותיה במשך מאות שנים.

ומקבילים. זאת, כדי להחדיר את האור ללא עיוות וגליות של הנוף הנשקף מבעד לחלון. הזכוכית הייתה עדיין יקרה והיא הותקנה רק בבנייני יוקרה או בבתים של בעלי אמצעים.

המהפכה התעשייתית, החישה את הפיתוח של שיטות מתקדמות עוד יותר להחדרת האור הטבעי אל תוך הבניינים. בסוף המאה ה-19 - החלו לייצר זכוכית בלוחות דקים וגדולים יחסית, באמצעות תנור היתוך המצוי בגובה רב. הזכוכית המותכת הייתה נוזלת כלפי מטה, בכיוון אנכי, בכוח הגרביטציה. בהמשך תהליך הקירור הייתה הזכוכית מועברת דרך מערכת גלילים, ומתקררת בהדרגה.

המהפכה התעשייתית החישה גם את הפיתוח של טכנולוגיות בניה חדשות, וביניהן שימוש בברזל, בברזל יציקה. השילוב של מסגרות מתכת עם שטחי זיגוג גדולים, אפשר בניה של מה שקרוי כיום בתי זכוכית.

שיטת הייצור של "זכוכית צפה" – Float glass – שהומצאה ע"י חברת פילקינגטון (Pilkington) הבריטית, בשנת 1959, הייתה המהפכה הגדולה הבאה בשיטות היצור של זכוכית שטוחה. לאחר יציקתה ועיבודה ללוח שטוח באמצעות מערכת גלילים משוכללת ומדויקת, נעה הזכוכית בצורה אופקית. עד



## זכוכית.

### מאז ועד היום.

סקייקון א.ק בע"מ.



### סקירה היסטורית:

עד לסוף המאה התשע עשרה וראשית המאה העשרים, הייתה התאורה הטבעית מקור האור העיקרי להארת בניינים. החלון בקיר או פתחי הגג היו האמצעים להחדרת האור הטבעי. כל עוד לא הוכנסה לשימוש נרחב הזכוכית לזיגוג החלונות, לא הייתה אפשרות להפרדה פיזית ממשית בין החוץ לפנים. החלון הפתוח היה חשוף לרוחות, אבק, זיהום, חום, קור ורעש. הברירה הייתה בין חשיפה מלאה של הפתח לשם החדרת אור היום או סגירתו בחומר שאינו מעביר אור.

הזכוכית, הומצאה כידוע לפני אלפי שנים. היא נוצלה למטרות רבות, כמו, תכשיטים, קישוטים, כלים ועוד, אבל לא לזיגוג. המגבלה הייתה יצירת לוח זכוכית שטוח, דק, שקוף וחזק במידה מספקת. השיטה הראשונה לייצור זכוכית לזיגוג הייתה סיבוב מהיר של גוש זכוכית מלוהטת ורכה בקצה מוט. הסיבוב הביא לשינוי בצורת הגוש עקב הכוח הצנטריפוגלי. בדרך זו היה ניתן לייצר לוחות זכוכית עגולים שהותאמו לתוך הפתחים. התהליך היה פרימיטיבי, יקר וגזל זמן רב. צורות השונות מן העיגול דרשו חיתוך והביאו לנפל של חלק ניכר משטח הלוחות העגולים. שימוש נרחב יחסית בזכוכית לחלונות החל באירופה במאה ה-12. מכיוון שהזכוכית אז הייתה יקרה, היא הותקנה בתחילה בעיקר במבני יוקרה כמו ארמונות ובתי תפילה.

במאות ה-16 עד ה-18 - למדו לצקת לוחות זכוכית במידות גדולות והולכות. אולם היציקה לא הייתה מדויקת. לאחר היציקה היה הכרח ללטש את שני משטחי לוח הזכוכית כדי לעשותם ישרים

### הזכוכית השטוחה השקופה :

הזכוכית השקופה הרגילה משמשת בעיקר לזיגוג חלונות. זכוכית זו מכילה תוספים שונים, ביניהם תחמוצות של ברזל, ולכן היא נראית קצת ירקרקה כאשר מסתכלים עליה דרך הדופן מהצד.

במקומות בהם מעוניינים בקשר חזותי מעולה בין הפנים לחוץ (במוזיאונים או בבניינים יוקרתיים) משתמשים בזכוכית שקופה במיוחד.

זכוכית כזו משתמשים גם למטרות מיוחדות כמו מסגור תמונות. הזכוכית מיוצרת עם פחות תוספים ובעיקר ללא ברזל והיא נראית לבנה לחלוטין. היא כמובן יקרה יותר מן הזכוכית הרגילה. תכונותיה מתוארות להלן, ראה הנתונים על זכוכית ה- Starphire.

### ההרכב הכימי :

ההרכב הכימי של זכוכית שקופה וזכוכית שקופה במיוחד.

זכוכית שקופה במיוחד Starphire float glass	זכוכית שקופה רגילה Float clear glass	
73.0%	73.0%	צורן דו-חמצני – Silicone Dioxide
15.0%	14.0%	נתרן חד-חמצני – Sodium Oxide
10.0%	9.0%	סידן חד-חמצני – Calcium Oxide
2.0%	4.0%	תוספים שונים – Trace Elements

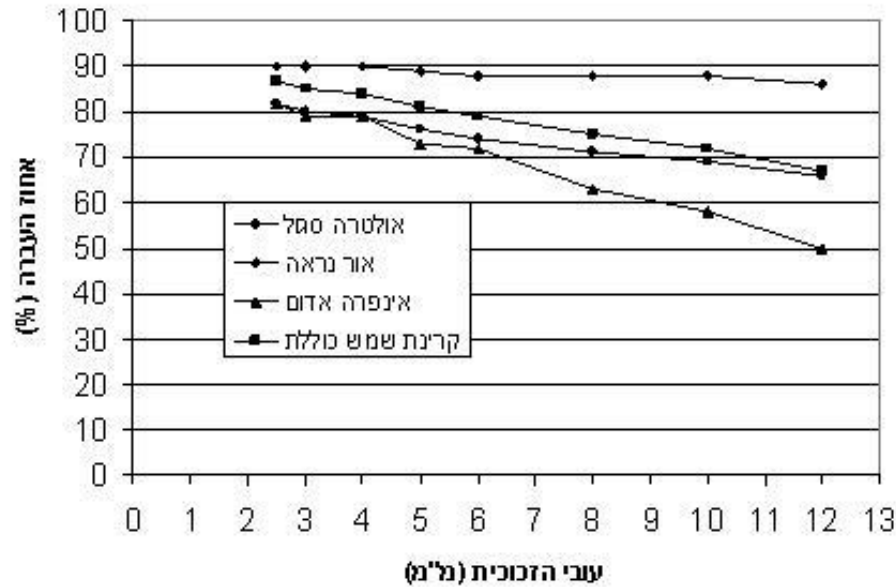
זכוכית כפולה לשיפור התפקוד התרמי של החלונות הינה טכניקה מקובלת זה שנים רבות בכל הארצות בעלות חורף קר. אולם, פיתוח הזיגוג בעל "הפליטות הנמוכה" – Low Emissivity Glazing – או כפי שמקובל לכנותו –זיגוג "Low E", הביא להגדלה משמעותית של כושר הבידוד התרמי של החלונות וקירות המסך, יחד עם כושר העברה גבוה בתחום האור הנראה. בעזרת זיגוג Low E מתאים, ניתן להשיג בידוד תרמי שיהיה שווה ערך לקירות מבודדים היטב, ברמה של קירות עם לבני איטונג. השימוש בזיגוג Low E נפוץ כיום גם באזורים חמים ומביא לחיסכון ניכר באנרגיה על מערכות הצינון במזגנים.

בשנים האחרונות מושקע מאמץ גדול במחקר ופיתוח של חומרי זיגוג המאפשרים בקרה דינמית של התכונות האופטיות של הזיגוג עצמו. הבקרה מבוססת על תכונות הכרומיות Chromic properties – של חומר הזיגוג. הזכוכית משנה את שקיפותה ע"י הפעלת זרם חשמלי בעוצמה נמוכה מאוד. בדרך זו, הזיגוג יוכל להפוך למערכת דינמית שיהיה ניתן לווסת אותה בהתאם לצרכי מעבר הקרינה ולמטרות של חיסכון באנרגיה.



## התכונות האופטיות

התכונות האופטיות ומשקל למ"ר של זכוכית שקופה בעובי שונה.



נדגים שינוי חשוב זה גם באמצעות הטבלה הבאה :

נגדיל את עובי הזכוכית מ-3.00 מ"מ, שהיא הזכוכית המקובלת בחלונות למגורים עם שימשה עד שטח 1.0 מ"ר, לעובי של 12.0 מ"מ כנדרש בחלונות בעלי שימשה בשטח העולה על 7.0 מ"ר.

התחום הספקטראלי	השינוי בהעברת הקרינה
האולטרה סגול	קטנה בשעור של 24%
האור הנראה	קטנה בשעור קטן של 5% בלבד
האינפרה אדום	קטנה בשעור ניכר מאוד של 64%
קרינת השמש, הכוללת את כל שלושת התחומים הקודמים	קטנה בשעור של 30%

כמובן שמשקל השמשה גדל באופן יחסי לעובי.

משקל	החזרה			העברה			עובי הזכוכית	
	מקדם הצללה	קרינת שמש כוללת	אור נראה	קרינת השמש הכוללת	אינפרה אדום	אור נראה		אולטרה סגול
ק"ג/מ"ר		%	%	%	%	%	%	מ"מ
6.5	1.01	8.0	7.0	87.0	82.0	90.0	82.0	2.5
7.8	1.00	8.0	7.0	85.0	79.0	90.0	80.0	3.0
10.4	0.99	8.0	7.0	84.0	79.0	90.0	79.0	4.0
13.0	0.97	8.0	7.0	81.0	73.0	89.0	76.0	5.0
15.6	0.96	7.0	8.0	79.0	72.0	88.0	74.0	6.0
20.8	0.94	7.0	8.0	75.0	63.0	88.0	71.0	8.0
23.9	0.91	7.0	8.0	72.0	58.0	88.0	69.0	10.0
31.2	0.87	7.0	8.0	67.0	50.0	86.0	66.0	12.0
15.6	0.62	6.0	5.0	37.0	10.0	72.0	41.0	<u>Azurlite</u> 6.0
15.6	1.03	8.0	8.0	89.0	87.0	91.0	87.0	<u>Starphire</u> 6.0

## ההעברה הספקטראלית

הזכוכית השקופה במיוחד, מעבירה יותר אור ביחס לזכוכית הרגילה, אולם, כדאי לשים לב כי היא מעבירה הרבה יותר גם את הקרינה האולטרה סגולה, הגורמת נזק לחומרים בתוך הבניין וכן יותר קרינה אינפרא אדומה, משמע מעבר חום רב יותר.

כידוע, קרינת השמש המגיעה אל כדור הארץ אינה מכילה כמעט אורכי גל הקצרים מ-3000 ננומטר. הקרינה הזו נבלמת ע"י שכבת האוזון. הזכוכית הרגילה אינה מעבירה קרינה מתחת ל-3000 ננומטר גם אם הייתה מגיעה אליה. היא מעבירה חלק ניכר מהקרינה בתחום האולטרה סגול שבין 300 עד 400 ננומטר. ההעברה הגבוהה ביותר היא בתחום הנראה, כמו כן, מעבירה הזכוכית חלק ניכר מקרינת החום האינפרא אדומה עד לאורכי גל שמעל 2,000 ננומטר.

הזכוכית השקופה במיוחד מסוגלת להעביר קרינה גם באורכי גל הקצרים מ-3000 ננומטר, אולם כפי שנאמר לעיל, קרינה כזו אינה מגיעה אל כדור הארץ, כך שאין הבדל בינה ובין הזכוכית השקופה בתחום זה. הזכוכית הזו מצטיינת בכך שהיא מעבירה יותר אור, אולם יש לשים לב כי היא מעבירה 13.0% יותר קרינה אולטרה סגולה בתחום שבין 300 עד 400 ננומטר, רק 3.0% יותר בתחום הנראה ו-15% יותר בתחום האינפרא אדום. אך החשוב ביותר הוא שהאפקט הכולל נותן תחושה של שקיפות מרשימה.

זכוכית הנקראת אזורלייט Azurlite, זכוכית באיכות גבוהה שפותחה ע"י חברת PPG, גוון כחלחל חלש. זכוכית זו מעבירה אמנם במקצת פחות אור נראה, אולם היא חוסמת הרבה יותר טוב מאשר הזכוכית השקופה את הקרינה האולטרה סגולה והקרינה האינפרא אדומה. זכוכית האזורלייט יקרה יותר, כמובן, מזכוכית שקופה רגילה.



## תהליכי העיבוד של הזכוכית

יצרני הזכוכית השטוחה מייצרים מגוון רחב מאוד של סוגים כדי לעמוד בצרכי הזינוג השונים והדרישות העיצוביות של טכנולוגיית הבניה. כל יצרן משתמש בשמות מסחריים משלו כדי לתת ייחוד למוצריו וכולל בקטלוגים את הנתונים הטכניים של מוצריו. נתונים אלה כוללים את תכונות ההעברה של קרינת השמש, האור הנראה, הקרינה האולטרה סגולה והאינפרא אדומה, תכונות החוזרה, תכונות מכניות, תכונות שחיקה, עמידה בדרישות בטיחות, צבעים שונים, גימורים שונים ודרישות מיוחדות. נסביר כאן את התכונות האופייניות העיקריות של סוגי זכוכית שונים.

## זכוכית מרוככת

הזכוכית המרוככת – annealed glass הינה המוצר היוצא מתהליך הייצור של הזכוכית הצפה (float glass). תהליך הקירור האיטי, הכרחי כדי לסלק את כל המתחיות והמאמצים בתוך לוח הזכוכית. מאמצים אלה עלולים להיווצר כאשר תהליך הקירור הוא מהיר מדי או בלתי אחיד. אז עלול הלוח להיות שביר מאוד ואפילו להישבר מעצמו. הזכוכית המרוככת בטוחה בפני שבר פתאומי כתוצאה מסילוק המאמצים הפנימיים, אולם החוזק המכני שלה קטן יחסית. זכוכית זו אינה מתאימה לשימושים בהם יש דרישות ביטחון ובטיחות גבוהות.

## זכוכית פירוליטית

פירוליזיז – pyrolysis הינו טיפול כימי בחומר בהשפעת חום. הזכוכית הפירוליטית - pyrolytic glass היא זכוכית שמוסיפים לה ציפוי או גוון בתהליך העיבוד, בו הזכוכית מחוממת מחדש עד למצב בו היא רכה. ציפוי

כזה יציב מאוד כמו הזכוכית עצמה. הטיפול בחום מנוצל גם למטרות נוספות, כמו הגדלת החוזק של הזכוכית והחיסום שלה, כפי שמוסבר להלן.

## זכוכית מחוזקת בחום

זכוכית מחוזקת בחום - heat strengthened glass – עוברת לאחר ייצורה הרגיל, טיפול נוסף בחום ובלחץ. היא מחוממת מחדש קרוב לטמפרטורת ההתרככות, ומקוררת במהירות מוגברת. לאחר הטיפול, נעשית הזכוכית בעלת חוזק מכני כפול לערך ביחס לזכוכית המרוככת. זכוכית כזו עדיין אינה נחשבת לזכוכית ביטחון.

## זכוכית מחוסמת

הזכוכית המחוסמת – tempered glass עוברת גם היא חימום נוסף ולחץ גדול יותר מאשר הזכוכית המחוזקת, והקירור נעשה בקצב מהיר ביותר. מתקבלת זכוכית בעלת חוזק מכני גדול בהרבה מזה של הזכוכית המחוזקת בחום, עד בערך פי 4 מאשר בזכוכית מרוככת. תהליך החיסום מבטיח כי כאשר הזכוכית נשברת כתוצאה מלחץ או הלם מכני, היא מתרסקת לגושים קטנים, בלתי חדים ששכנתם קטנה. הזכוכית המחוסמת ניתנת להתקנה במקומות בעלי דרישות בטיחות גבוהות.

## זכוכית מונוליטית

לאחר תהליך החיסום, לא ניתן לשנות דבר בלוח הזכוכית. לכן, יש לחתוך את הזכוכית למידה הדרושה וכן לתת לה את כל הציפויים והטיפולים הדרושים, לפני החיסום. במהלך החיסום מקפידים מאוד על מתן אחידות לעובי הלוח. כך, מגיע לוח הזכוכית לאתר הבניה בצורתו הסופית המוגמרת – המונוליטית – monolithic glass בלי שיהיה ניתן לעשות בה שום שינויים.

## ציפויים

בנוסף לציפוי בשיטה הפירוליטית, שהוא בדרך כלל חלק מתהליך הייצור עצמו, מקובלת כיום שיטה משוכללת נוספת לציפויים של הזכוכית. לאחר ניקוי יסודי וייבוש, מוכנס לוח הזכוכית לתא אטום. שמרוקנים מתוכו את האוויר, ויוצרים ואקום. הציפוי המתכתי מותז אל הזכוכית בתוך שדה מגנטי

– MSVD- magnetic sputter vacuum deposition. בדרך זו ניתן לקבל שכבות ציפוי דקיקות ואחידות. כאשר רוצים לתת מספר ציפויים על אותו לוח זכוכית, מתיזים את חומרי הציפוי בזה אחר זה – MLMSVD- magnetic sputter vacuum deposition multilayer על אותו המשטח.

## סוגי הזכוכית

תהליכי העיבוד שתוארו לעיל מהווים בסיס להמשך הייצור של סוגים רבים של זכוכית לצרכים ושימושים בתנאים שונים של אקלים, דרישות ארכיטקטוניות, מכניות ובטיחותיות. להלן מובא תיאור של כמה סוגים נוספים.

## זכוכית משוכבת

נקראת גם זכוכית הסנדוויץ' – Laminated Glass. השמשה עשויה משתי שכבות זכוכית, דקות יחסית, המודבקות לפילם מחומר פלסטי, כמו פוליוויניל-בוטיראט – polyvinyl butyrate, בעובי 0.8 מ"מ. עובי שכבות הזכוכית נקבע בהתאם לחוזק המכני הדרוש, כאשר הפילם מודבק בין שתי השכבות. עובי הפילם הפלסטי, נע בין 0.5 מ"מ עד 2.0 מ"מ, לפי הדרישות. הפילם הפלסטי יכול להיות שקוף או בעל תכונות נוספות, כגון חסימת קרינה אולטרה סגולה או בעל צבע. כפי שניזכר לעיל, הזכוכית המשוכבת נותנת בידוד אקוסטי טוב יותר מאשר שכבת זכוכית בודדת באותו העובי הכולל.



## זכוכית סלקטיבית

זכוכית שקופה מעבירה את האור הנראה (400 – 700 ננומטר) וקרנינה אינפרה אדומה, הקרובה לאור הנראה – near infra red (700 – 1,500 ננומטר). יש להזכיר כי רק חלק זעיר מקרינת השמש המגיעה לכדור הארץ הינה באורכי גל שמעל ל-1,500 ננומטר.

במטרה לשפר את התפקוד התרמי של הזכוכית, היינו, לשמור ככל האפשר על העברה גבוהה בתחום הנראה, אולם להקטין את העברת הקרינה בתחום האינפרה אדום, פיתחו היצרנים תוספים או ציפויים לזכוכית, בעלי העברה סלקטיבית. השמות המסחריים מצביעים על התכונות האופייניות שבעזרתן רוצים לשווק את המוצר: “זכוכית בולעת חום” – heat absorbing glass, “זכוכית נוגדת חום” – heat resistant glass, ועוד.

יש לזכור היטב, כי כל זכוכית, בולעת כמות מסוימת של הקרינה העוברת דרכה. קרינה זו גורמת לעליה בטמפרטורת הזכוכית. ככל שמקדם המעבר נמוך יותר, תיבלע כמות גבוהה יותר של חום והזכוכית תתחמם יותר. חום זה מתפזר, גם פנימה אל תוך אויר החלל וגם החוצה אל האוויר החיצון, באופן יחסי הפוך לטמפרטורות הפנים והחוץ.



פירוש הדבר, שיותר חום מן הזכוכית יפלט בקיץ לתוך החלל המקורר מאשר החוצה. ולהיפך, יותר חום יפלט ממנה בחורף החוצה, כי הפנים חם יותר. דוגמה טובה של זכוכית סלקטיבית היא זכוכית האזורלייט Azurlite, הניזכרת לעיל.

הזכוכית הסלקטיבית מיוצרת במבחר גדול של צבעים: אפור, תכלת, כחול, ירוק, זהב-ברונזה, חום ועוד. הצבע נבחר משיקולים עיצוביים-אסתטיים.

## זכוכית רפלקטיבית

השימוש בזכוכית הרפלקטיבית מקובל כיום על ידי ארכיטקטים רבים. המראה הרפלקטיבי של הבניין נותן לו מימד של יוקרה.

התוספים או הציפויים שנסקרו בסעיף הקודם משנים את תכונות ההעברה של הזכוכית בתחומי הספקטרום השונים. דרך נוספת להקטין את כמות הקרינה החודרת דרך הזכוכית היא ציפוי רפלקטיבי על הדופן החיצוני שלה. היתרון התרמי הוא בכך שחלק מקרינת השמש הפוגעת במשטח מוחזרת עוד לפני שהיא חודרת אל תוך לוח הזכוכית ומחממת אותה. נוסף להקטנת כמות הקרינה החודרת דרך החלונות, מונעת הזכוכית הרפלקטיבית בשעות היום את האפשרות לראות דרך החלונות את הנעשה בתוך הבניין. לעומת זאת, האנשים בתוך הבניין יכולים לראות את הנעשה בחוץ. המצב מתהפך בשעות החשכה. הזכוכית הרפלקטיבית מונעת ראייה דרכה מן הכיוון המואר יותר. לעיתים, רוצים להתקין את הציפוי על זכוכית שקופה, בחלונות קיימים. במקרה כזה, ניתן להדביק פילם רפלקטיבי, המיוצר למשל על ידי חברת הענק האמריקאית M3, או לצפות את החלונות בצביעה, למשל, ע"י צבע סלקטיבי של

חברת SunX. משך החיים של ציפוי בהדבקה או צביעה, מוגבל. החומר עלול לקבל שריטות בניקוי לא זהיר והוא מתנתק לאחר זמן מן הזכוכית ומתקלף ממנה.

שעור הרפלקטיביות נקבע על ידי עובי שכבת הראי. כידוע, זכוכית שקופה מחזירה 6% עד 8% מהקרינה המגיעה אליה. באמצעות הציפוי הרפלקטיבי ניתן להגיע לרפלקטיביות של 35% ואפילו עד 40%. נוסף לרפלקטיביות של ראי מוכסף, ניתן להוסיף לזכוכית את אחד הגוונים שהוזכרו לעיל, ולקבל זכוכית רפלקטיבית צבעונית.

יש להזהיר מהשימוש בזכוכית בעלת רפלקטיביות גבוהה עקב המטרדים העלולים להיגרם. החזר קרינת השמש אל בניינים סמוכים עלול לשבש את המאזן האנרגטי שלהם, כאשר קרינת שמש תוחזר אליהם מבניינים סמוכים. סכנה נוספת היא סינוור מוחזר מקיר הזכוכית הרפלקטיבית.

כדי להקטין את המיטרדים לשעור סביר, קיימות במדינות שונות תקנות האוסרות על שימוש בזכוכית שהרפלקטיביות שלה עולה על 20%, זאת, אם ההחזרים עלולים להגיע לבניין שכן או לדרך הומה.

## קביעת עובי הזכוכית

עובי הזכוכית הדרוש בחלונות נקבע ע"י גודל השמשה בהתחשב בשיקולים שונים, בעיקר חוזק הלוח בפני עומס סטטי של הרוח (ביחידות ניוטון למ"ר), חבטה מכנית ובטיחות. תקן ישראלי – ת"י 1099 משנת 1981, קובע את העובי המינימלי של שימשת הזכוכית בחלון. בנוסף לשיקולים הנזכרים לעיל, מהווה מחיר הזכוכית ומשקלה גורם חשוב בבחירה. כמובן, ככל שעולה העובי מתייקר הזיגוג. גם משקל השמשה גדל ויש להתחשב בכך בחישובים הסטאטיים-קונסטרוקטיביים.

בתקן משנת 1981, נקבע העובי הדרוש לשמשת החלון לפי השטח שלה והקומה בבניין (המהדורה מתעדכנת לעיתים ולכן עשויים נתוני טבלה זו להשתנות).

שטח השמשה (מ"ר)											
עובי השמשה (מ"מ)	בנינים עד 6 קומות	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	בנינים מעל 6 קומות	3.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

### זיגוג רב שכבתי

שימשת החלון מספקת אמנם הפרדה פיזית בין החוץ לפני הבניין ומבטיחה החדרה מעולה של אור היום. אולם, הבידוד התרמי שלה הוא ברמה נמוכה למדי. עובי השמשה השקופה משפיע מעט מאוד על מקדם המוליכות התרמית ה-U value (בתנאי הארץ). הגדלת עובי הזכוכית פי 4 מביאה בסך הכל להקטנה של 6% במוליכות התרמית של החלון.

נניח שיש להבטיח בתוך הבניין טמפרטורת נוחות של 20°C, וביום חמסין כבד תהייה הטמפרטורה בחוץ 40°C. ההפרש הוא 200. אם בחלונות, או קירות המסך של הבניין מותקנת, לדוגמה, שימשה בודדת של 6.0 מ"מ, יהיה מקדם המוליכות התרמית 0.6910 W/m<sup>2</sup>. בתנאים אלה, יעביר כל מטר רבוע של השמשה חום בשיעור של 138 ואט. משמעות הדבר, כי כל שעה יחדירו 7.0 מ"ר של שטח הזיגוג 1.0 ק"ט של חום מן החוץ פנימה. זהו חום הנוסף להעברה ע"י הקרינה שתחדור דרך אותם החלונות.

בתנאי החורף זרימת החום תהיה הפוכה, מן הפנים החוצה ועקב כך גדלות ההוצאות על החימום.

### זיגוג כפול

שיפור ניכר בתפקוד התרמי מושג כאשר מתקינים זיגוג רב שכבתי. בדרך כלל מסתפקים בזיגוג דו שכבתי (כפול). כאשר האקלים הוא קיצוני, או כאשר רוצים להשיג בידוד תרמי מעולה, מתקינים גם זיגוג תלת שכבתי. שכבות הזכוכית מותקנות במרחק של 5 מ"מ עד 15 מ"מ ביניהן. בארצות הברית מקובל מירווח של 1/2", היינו 12.5 מ"מ.

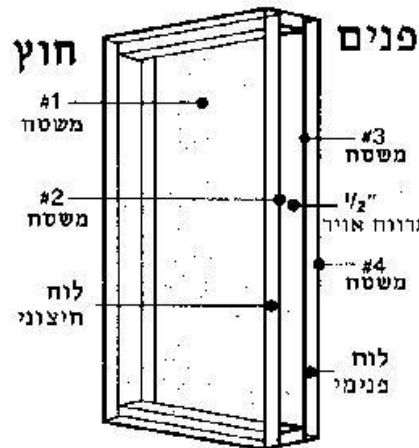
הזיגוג הכפול מותקן בשטח גדול יחסית ולכן עובי הזכוכית הינו לפחות 4 מ"מ עד 6 מ"מ. בחלונות גדולים יותר יש להתקין זכוכית של 8 מ"מ עד 12 מ"מ בהתאם לגודל השמשה. העובי הכולל של החלון במקרים אלה עשוי להגיע ל-12.0 מ"מ עד ל-36 מ"מ. כדי שיהיה ניתן לציין את המשטח עליו נעשים הציפויים למיניהם, הוסכם למספר את המשטחים של הזיגוג. המשטח החיצוני, של הזכוכית החיצונית הוא משטח מס' 1. המשטח הפנימי של זכוכית זו הינו משטח מס' 2. המשטח הפונה החוצה של הזכוכית הפנימית הינו משטח מס' 3 והמשטח הפנימי שלה הוא משטח מס' 4.

### מבנה השכבות

לוח הזכוכית הפנימי של זיגוג כפול הינו בדרך כלל לוח שקוף. העובי של הלוח הפנימי יכול להיות דק יותר מאשר הלוח החיצוני. למשל, בחלונות שיש להתקין זכוכית חיצונית של 6.0 מ"מ, מתקינים לעיתים מטעמי חיסכון, זכוכית פנימית בעובי של 4.0 מ"מ. עקב החשש של פגיעה מכנית מבפנים, נהוג להתקין בדופן הפנימי זכוכית מחוסמת. הלוח החיצוני מקבל, לרוב בדופן הפנימי שלו, את הציפויים למיניהם. ציפוי רפלקטיבי ניתן כמובן, על משטח מס' 1. במקרים רבים קיים יותר מציפוי אחד.

### מסגרת החלון

המעבר ממסגרות העץ המסורתיות למסגרות מתכת, בעיקר אלומיניום, גרם להגדלת ההפסדים עקב הולכת החום הטובה של המתכת. דבר זה הביא לפיתוח של מסגרות בהן קיימת הפרדה תרמית בין החלק החיצוני לחלק הפנימי של המסגרת על ידי חומר בעל מוליכות תרמית נמוכה. בארץ עדיין מתקינים לרוב מסגרות ללא הפרדה תרמית.



### החלל בין הזכוכיות

החלל שבין הזכוכיות צריך להימצא בלחץ אטמוספירי רגיל. נחוץ גז בחלל שבין הזכוכיות לאיזון הלחצים בין הפנים לחוץ. הגז צריך להיות יבש, ללא אדי מים. לרוב ניתן להסתפק באוויר נקי ויבש. אולם, ניתן להקטין עוד יותר את הולכת החום דרך הגז על ידי שימוש בגזים אצילים כמו ארגון וקריפטון.



## זכוכית עם פליטות נמוכה –

### Low emissivity glass

שיפור מהפכני בתפקוד התרמי של חלונות הושג עם הפיתוח של ציפוי הנקרא "ציפוי עם פליטות נמוכה" - Low Emissivity Coating .

### פליטות – Emissivity

כל גוף שהטמפרטורה שלו גבוהה מטמפרטורת הסביבה, בדרך כלל האוויר שמסביבו, פולט קרינה תרמית (קרינה בתחום הספקטרום האינפרא אדום). הפליטה יחסית להפרשי הטמפרטורות. אולם, היא תלויה גם בכושר הפליטה

– הפליטות ה-emissivity או ה-emittance של המשטח. למשל, קומקום המצופה בשכבת ניקל מבריקה, יפלוט פחות קרינה לאוויר שמסביבו מאשר קומקום לא מבריק. הפליטות, ה-emissivity או ה-emittance המסומנות באות e, מוגדרת כערך יחסי לשיעור פליטת הקרינה התרמית של משטח כלשהוא, בהשוואה לפליטת הקרינה מגוף שחור, באותה הטמפרטורה. אי לכך, הערך המירבי של e מגיע ל-1. ככל שהמשטח יהיה בעל כושר פליטת קרינה נמוך יותר, קטן הערך של e.

### מעבר קרינה דרך זכוכית

מעבר קרינת השמש דרך הזכוכית תלוי בשני גורמים עיקריים, מקדם המעבר של הזכוכית בתחום הספקטרום הכולל של קרינת השמש ותכונות הפליטות של משטחי הזכוכית. הפליטות של משטחי זכוכית, בגוונים שונים, הינה 0.840, היינו, 84% מהפליטות התיאורטית של גוף שחור. כאשר רוצים להקטין את מעבר הקרינה דרך הזכוכית, יש להקטין את הפליטות שלה. זאת ניתן לעשות על ידי ציפוי סלקטיבי, המחזיר קרינה בתחום הספקטרום הרצוי, במקרה שלנו בתחום האור הנראה, ומקטין ככל האפשר את המעבר בתחום הספקטרום האלטריווילי הבלתי רצוי, במקרה שלנו בתחום קרינת החום, היינו, בתחום האינפרא אדום. ציפוי כזה נקרא, "ציפוי בעל פליטות נמוכה" – Low Emissivity Coating. הציפויים הללו רגישים לחחות באוויר, ולכן לא ניתן להשתמש בהם בזיגוג בעל שיכבה אחת, והכרח להתקנם רק בחלל אטום – בין שתי השכבות של זיגוג כפול.