د. عباس محمد الزعفرانى مدرس بكلية التخطيط العمرانى جامعة القاهرة
أ.م.د. أحمد أحمد فكرى أستاذ مساعد بقسم العمارة كلية الهندسة جامعة القاهرة

كاسرات الشمس المصغرة المدمجة داخل الزجاج
مدخل معمارى لتطوير زجاج ذو نفاذية إنتقائية لإتجاه الأشعة

ملخص البحث

الزجاج المنتقى لاتجاه الضوء هو أحد التحديات التكنولوجية التى تواجه الهندسة البيئية، فهو يستطيع تمرير الضوء القادم من اتجاهات محددة، بينما يمنع الضوء القادم من اتجاهات أخرى، ليقوم بدور كاسرات الشمس فى تمرير الإشعاع الشمسي المباشر شتاءا ومنعه صيفا، أو تمرير الأشعة المشتتة اللازمة للإضاءة الطبيعية مع منع الإشعاع المباشر المسبب للإبهار، أو تحقيق الرؤية للخارج مع حماية الخصوصية. مع الاستغناء عن بروز كاسرات الشمس، مما يعفى المعمارى من المشاكل التشكيلية أو الوظيفية التى قد تسببها، كما يفتح الباب للاستفادة من الخواص الانتقائية لكاسرات الشمس التى يجيد المعماريون التعامل معها.

ويتناول البحث عدة تقنيات مستخدمة حاليا أو تحت التطوير للوصول إلى تصنيع زجاج من هذا النوع بتكلفة اقتصادية وبصفات معمارية ملائمة. والتى يعتمد بعضها على تقنيات متقدمة، بينما بعضها الآخر بسيط يمكن تطبيقه بسهولة، وكذلك يشمل توضيح الطرق العلمية لتصميم كاسرات الشمس المدمجة داخل الزجاج والفارق بينها وبين الكاسرات العادية، واقتراح طريقة جديدة لتنفيذ كاسرات الشمس المدمجة داخل الزجاج بطريقة بسيطة تصلح للتطبيق المباشر.

تمهيد

كان التطور فى تقنية الزجاج واحدا من العوامل الرئيسية التى شكلت صورة العمارة الحديثة ومابعدها، وكان لانتشار المساحات الواسعة من الزجاج تأثير بيئى ايجابى أحيانا، وتأثير سلبى فى معظم الأحيان، نتيجة ما تسبب فيه من زيادة استهلاك المبانى للطاقة بشكل يؤثر سلبا على البيئة، وهو ما دفع البحث العلمى فى مجال العمارة البيئية إلى محاولة تطوير أنواع من الزجاج أكفأ بيئيا وأكثر قدرة على انتقاء المؤثرات التى تسمح بمرورها. وكان معظم هذا الجهد مركزا على مهندسى المواد وعلماء الفيزياء والكيمياء ومؤخرا مهندسى الالكترونيات. أما المعمارى فعادة ما يكون دوره هو المفاضلة بين الأنواع المتوافرة لاختيار النوع الأنسب معماريا. فى حين ينصب جهده البحثى على تطوير وسائل معمارية تمنع المؤثرات البيئية من الوصول للزجاج، سواء بتوجيه الفتحات وتحديد مساحاتها، أو بتصميم وسائل الإظلال وأهمها كاسرات الشمس،

لما لها من انتقائية عالية.

وهذا البحث هو محاولة لفتح الباب للباحث المعمارى للمشاركة بدور ايجابى فى تطوير لزجاج، بالاستفادة من قدرات المعماريين على التعامل مع الإظلال ، والتى تفوق قدرات غيرهم، بحكم أن هذه النوعية من المشاكل هى مشاكل جيومترية ثلاثية الأبعاد فى جوهرها، يبدأ المعمارى التعامل معها منذ دروسه الأولى فى الظل والمنظور. ثم يطورها فى دراسة العمارة البيئية بالتعامل مع زوايا سقوط الشمس وتصميم كاسراتها. مما يرشحه للمشاركة فى تطوير أحد أنواع الزجاج المتقدمة، وهو الزجاج ذو النفاذية الانتقائية لاتجاه الأشعة.

وهذا الزجاج هو أحد التحديات التكنولوجية التى تواجه الهندسة البيئية، حيث لا تزال الأبحاث تجرى للوصول إلى نوع من الزجاج يستطيع تمرير الضوء القادم من اتجاهات محددة، بينما يمنع الضوء القادم من اتجاهات أخرى، حيث يمكن للزجاج إذا اكتسب هذه الخاصية القيام بدور كاسرات الشمس فى تمرير الإشعاع الشمسي المباشر شتاءا ومنعه صيفا، أو تمرير الأشعة المشتتة اللازمة للإضاءة الطبيعية مع منع الإشعاع المباشر المسبب للوهج والإبهار، أو تحقيق الرؤية للخارج فى اتجاهات معينة وحماية الخصوصية من الانكشاف فى اتجاهات أخرى.

ويتميز الزجاج المنتقى لاتجاه الضوء بالاستغناء عن بروز كاسرات الشمس، مما يعفى المعمارى من المشاكل التشكيلية أو الوظيفية التى قد تسببها وتمنعه من استخدامها، كما يفتح الباب للاستفادة من الخواص الانتقائية لكاسرات الشمس التى يجيد المعماريون التعامل معها فى تطبيقات جديدة مثل إظلال نوافذ وسائل المواصلات كالسيارات والقطارات، وتطبيقات عديدة بعيدة عن المجالات المعمارية.
وتتناول الصفحات التالية عدة تقنيات مستخدمة حاليا أو تحت التطوير للوصول إلى تصنيع زجاج من هذا النوع بتكلفة اقتصادية وبصفات معمارية ملائمة، وكذلك توضيح الطرق العلمية لتصميم كاسرات الشمس المدمجة داخل الزجاج.

هدف البحث ومنهجه

الهدف الرئيسى للبحث هو **فتح الباب لمشاركة المعماريين البيئيين فى البحث العلمى لتطوير الزجاج ذو النفاذية الانتقائية لاتجاه الأشعة، بصفتهم الأقدر على التعامل مع الإظلال** ، وذلك عن طريق تعريف هذه النوعية من الزجاج ومميزاته وعيوبه، وكذلك تعريف وتصنيف الطرق المقترحة حاليا واتجاهات التطور العالمى فى هذا النوع من الزجاج لفتح المجال لتوظيفه معماريا، وتوضيح الطرق العلمية لتصميم كاسرات الشمس المدمجة داخل الزجاج، والاختلافات الرئيسية بين طرق تصميمها وطرق تصميم الكاسرات المعتادة فى الهواء الطلق، وهو المجال المتوقع أن يسهم المعماريون من خلاله فى تطوير هذه النوعية من الزجاج.

منهج البحث:

يجمع بين المنهج التحليلى المقارن ومنهج الاستنباط الرياضى، و يعمد إلى الوصول إلى هدف البحث من خلال ثلاثة أجزاء رئيسية:

١- التوصيف العلمى لتأثير اتجاه الإشعاع على انتقاله عبر الزجاج
٢- عرض وتصنيف التقنيات المستخدمة فى الزجاج ذو النفاذية الانتقائية لاتجاه الأشعة
٣- تصميم كاسرات الشمس المدمجة داخل الزجاج والفرق بينها وكاسرات الشمس العادية

١- المبادئ العلمية لتأثير اتجاه الإشعاع على انتقاله عبر الزجاج

إن اتخاذ القرارات المعمارية بشأن التعامل مع الإشعاع الشمسى وكيفية نفاذه عبر الزجاج يحتاج لفهم كاف لخواصهما، ويحاول هذا القسم تقديم خلفية علمية لفيزياء الإشعاع الشمسى وكيفية نفاذه من الزجاج، تكفى لفهم كيفية عمل الزجاج خاصة ذو الصفات الانتقائية لاتجاه الضوء.

١-١ الانكسار

حين يسقط الشعاع على السطح الخارجى للزجاج ينكسر ويتحرك داخله بزاوية تختلف عن زاوية السقوط، حتى يصل الشعاع إلى السطح الداخلى للزجاج، فينكسر فى الاتجاه العكسى أثناء الخروج، مستعيدا اتجاهه الأصلى نظرا لتوازى سطحى الزجاج.

وتخضع قيم زاوية الانكسار لقانون **سنيل** Snell وهو يحدد العلاقة بين زاوية السقوط φ وزاوية الانكسار φ'

وذلك بدلالة الكثافة الضوئية للوسط الذى يمر فيه الزجاج قبل الانكسار n والكثافة الضوئية للوسط الذى يمر فيه الزجاج بعد الانكسار n'

قانون سنيل:

$$\frac{n}{n'} = \frac{\text{Sin } \varphi}{\sin \varphi'}$$

ولتحديد زاوية الانكسار φ' يتحول شكل المعادلة ليصبح

$$\sin \varphi' = \text{Sin } \varphi \frac{n'}{n} \qquad \varphi' = \sin^{-1} (\text{Sin } \varphi \ \frac{n'}{n})$$

وبالنسبة لنفاذ الإشعاع الشمسى من الهواء إلى الزجاج ، تكون الكثافة الضوئية للهواء n مساوية للواحد الصحيح، بينما الكثافة الضوئية للأنواع المعتادة من الزجاج n' تبلغ ١,٥ تقريبا، وعلى هذا يمكن تبسيط المعادلة لتحديد زاوية الانكسار

فى حالة الانتقال من الهواء إلى الزجاج

$$\varphi' = \sin^{-1} \left(\frac{\text{Sin } \varphi}{1.5} \right)$$

فى حالة الخروج من الزجاج إلى الهواء

$$\varphi' = \sin^{-1} (\text{Sin } \varphi \times 1.5)$$

ومن هذه المعادلة يمكن تحديد الزاوية التى يتحرك بها الشعاع داخل الزجاج المقابلة لزاوية سقوطه عليه. ويلخص جدول – ١ قيم زاوية الانكسار المقابلة لمجموعة من قيم زاوية السقوط.
ويلاحظ فى هذا الجدول أن الشعاع العمودى على سطح الزجاج (زاوية سقوطه = صفر) لا يتغير اتجاهه (زاوية الانكسار = صفر) وان زاوية الانكسار لا تتعدى ٤١,٨ مهما زادت زاوية السقوط حتى لواقتربت من التوازى مع سطح الزجاج (شكل-١)

جدول – ١
العلاقة بين زاوية السقوط وزاوية الانكسار فى الزجاج العادى $n'=1,5$

زاوية السقوط (فى الهواء)	زاوية الانكسار (داخل الزجاج)
٠	٠
١٠	٦,٦
٢٠	١٣,٢
٣٠	١٩,٥
٤٠	٢٥,٤
٥٠	٣٠,٧
٦٠	٣٥,٣
٧٠	٣٨,٨
٨٠	٤١,١
٩٠	٤١,٨

١-٢ الانعكاس الجزئى

عند سقوط شعاع الضوء على سطح الزجاج ينعكس منه جزء وينكسر جزء آخر ويدخل إلى الزجاج (شكل-٢)، وتتغير النسبة بين المنعكس والمنكسر بتغير زاوية السقوط، فعند زاوية السقوط صفر (الضوء عمودى على الزجاج) يكون انعكاس الضوء من السطح الواحد مساويا ٤%، بينما ينكسر الباقى ، وكلما زادت زاوية السقوط بزيادة ميل الشعاع زادت نسبة الجزء المنعكس، وليمكن حساب هذه النسبة من الأشعة يتم تطبيق معادلات فرينل، والتى تحدد نسبة الضوء المنعكس بمعلومية زاوية السقوط ومعامل انكسار الزجاج واتجاه استقطاب الضوء، والمصطلح الأخير غير مألوف للمعماريين، وهو ما دفع معظم الكتب المعمارية التى تتعامل مع نفاذ الضوء من الزجاج لتفادى استخدام معادلات فرينل واستبدلت بها المنحنيات التقريبية المعروفة لتغير نفاذية الزجاج مع زاوية السقوط (شكل-٣).

وقد كانت هذه المنحنيات كافية للتعامل مع الزجاج العادى، ولكن ليتم التعامل مع زجاج ذو نفاذية انتقائية للاتجاه يعتمد على الانعكاس أو لتصميم كاسرات شمس مدمجة داخل الزجاج يكون التعامل مع مفهوم استقطاب الضوء ضروريا لفهم كيفية نفاذ الإشعاع من الزجاج والتقدير الكمى الصحيح لنسبة الضوء المنعكس ونسبة الضوء النافذ، خاصة مع تتابع الطبقات التى يتم عليها الانعكاس. وتعرض السطور التالية باختصار مفهوم استقطاب الضوء

استقطاب الضوء Polarization

الضوء هو موجات كهرومغناطيسية، وهى نوع من الموجات المستعرضة ، أى التى يكون اتجاه التماوج فيها عموديا على اتجاه سريان الموجة (مثل أمواج البحر، حيث تتحرك المياه صعودا وهبوطا بينما تسرى الموجة أفقيا فى اتجاه الشاطىء، ولما كانت كل موجات البحر ذات اتجاه تماوج واحد (رأسى)، فإنها بذلك تكون موجات مستقطبة، ويكون اتجاه الاستقطاب لموجات البحر رأسيا.

أما موجات الضوء فيتعدد اتجاه تماوجها فيمكن أن يكون افقيا أو رأسيا أو مائلا، فاذا كان الضوء كله ذو اتجاه تماوج واحد يكون ضوءا مستقطبا، اما الضوء الطبيعى الذى نعرفه فيكون خليطا من اتجاهات الاستقطاب. ولا تميز العين البشرية بين نوعى الضوء المستقطب وغير المستقطب، لذا ليس الفارق بينهما معروفا على نطاق واسع. (شكل-٤)

ولكن عند سقوط الأشعة مائلة على سطح لوح الزجاج، تختلف نفاذية الزجاج لها تبعا لاتجاه استقطابها وزاوية سقوطها، حيث تختلف نفاذيته للضوء ذو الاستقطاب الرأسى (يتماوج فى مستوى عمودى على سطح الزجاج)، والضوء ذو الاستقطاب الأفقى (يتماوج عموديا على الاتجاه السابق)، ولما كان الضوء خليطا من الأشعة التى لكل منها اتجاه استقطاب مختلف، فيمكن تحليل التموج فى اتجاهات الاستقطاب المائلة إلى مركبتين توازى احداهما اتجاه الاستقطاب الرأسى وتوازى الأخرى اتجاه الاستقطاب الأفقى. وتكون النسبة متساوية بين اتجاهى الاستقطاب بالنسبة للضوء غير المستقطب. (شكل-٥)

ولتطبيق معادلات فرينل، يتم حساب نسبة الانعكاس لكل من اتجاهى الاستقطاب على حدة، ثم جمع المنعكس من الاثنين، وكذلك حساب المنكسر من كل اتجاه على حده، ويمكن جمع القيمتين لكن دون فقد القيم المستقلة. فعادة ما يكون الضوء النافذ مستقطبا يشكل جزئى (لا تتساوى فيه نسبة اتجاهى الاستقطاب) ولذا يكون من الضرورى استخدام الرقمين المستقلين كل على حدة فى مراحل الالنعكاس الجزئى التالية.

قانون فرينل للانعكاس **Fresnel law** (of Reflection)

$$R_s = \left\{ \frac{\sin^2(\varphi - \varphi')}{\sin^2(\varphi + \varphi')} \right\}^2 \qquad R_p = \left\{ \frac{\tan^2(\varphi - \varphi')}{\tan^2(\varphi + \varphi')} \right\}^2$$

R_s: Reflectance of glass for vertical Polarization

R_p: Reflectance of glass for horizontal Polarization

φ : Angle of Incidence

φ' : Angle of Refraction (calculated from Snell Law)

الانعكاس الجزئى المتكرر

وعند سقوط الضوء على السطح الخارجى للزجاج، ينفذ جزء منه ليصل إلى السطح الداخلى، فينعكس جزء منه، وينكسر الجزء الآخر خارجا من الزجاج. أما الجزء الذى انعكس فيعود إلى السطح الخارجى، ويتكرر الأمر عدة مرات، وهو ما يصعب من استنتاج انعكاسية لوح

الزجاج الكلية بدقة بالجمع الجبرى لانعكاسية سطحيه، وإن كان اهمال الانعكاسات الثانوية يقلل الدقة بحوالى ٥% فقط (شكل-٦)

١-٣ الانعكاس الداخلى الكلى.

عند خروج شعاع الضوء من داخل الزجاج إلى الهواء، يتم انكساره بطريقة معاكسة لانكساره عند دخوله إلى الزجاج، حيث تزيد زاوية الانكسار عن زاوية السقوط، وينطبق قانون سنيل عليه أيضا فاذا كان معامل انكسار الزجاج ١,٥ كانت العلاقة بين الزاويتين:

$$\varphi' = \sin^{-1} \left(\frac{\text{Sin } \varphi}{1.5} \right)$$

ولكن هناك اختلافا رئيسيا بين نوعى الانكسار، فزاوية سقوط الشعاع عند اتجاهه للخروج من الزجاج لا يحب أن تتعدى 41.8 ° ليمكنه النفاذ، وهى التى تسمى الزاوية الحرجة، فإذا زادت عن ذلك ينعكس الشعاع إلى داخل الزجاج مرة أخرى، وهى ظاهرة تعرف باسم الانعكاس الداخلى الكلى. ويمكن التنبؤ بذلك من المعادلة نفسها، حيث ان استخدام قيمة أكبر من الزاوية الحرجة تعنى أن قيمة جيب زاوية الانكسار هو رقم أكبر من الواحد الصحيح، وهو ما يستحيل رياضيا. كما أن استخدام معادلات فرينيل للانعكاس الجزئى تجعل قيمة الانعكاسية تتزايد حتى تصل إلى اللانهاية عند زاوية السقوط الحرجة، وتكون زاوية الانعكاس الداخلى الكلى مساوية لزاوية السقوط، اى أن سطح الزجاج يتحول إلى مرآة عاكسة.

ونستغل هذه الظاهرة فى الألياف الضوئية التى تعتمد على الانعكاس الداخلى الكلى لحبس الضوء داخل الشعيرات الزجاجية الرفيعة وتوصيله بعد عدد هائل من الانعكاسات إلى موقع بعيد. ويمكن استغلال هذه الالياف معماريا لنقل الاضاءة الطبعية إلى عمق المبنى، وأن كان ذلك يخرج عن نطاق البحث. أما الاستعمال الأهم معماريا فهو استخدام زجاج ذو قطاع منشورى غير مستوى ، بحيث يعكس السطح الداخلى للزجاج الضوء فى بعض زوايا السقوط التى تصل إليه، مما يسمح باعطاءه انتقائية لزاوية السقوط. (شكل-٧)

ولا يحقق الزجاج المستوى ذو السطحين المتوازيين انعكاسا كليا، حيث أن الضوء المنكسر من احد السطحين يسقط دائما على السطح الموازى له بزاوية تقل عن الزاوية الحرجة. لذلك يتم تغيير شكل أحد سطحى الزجاج للاستفادة من هذه الخاصية، وتحويل المقطع المستطيل للزجاج إلى مقطع منشورى

٢- التقنيات المستخدمة فى الزجاج ذو النفاذية الاختيارية

من القسم السابق يتضح أن الزجاج العادى تتغير نفاذيته للأشعة الساقطة عليه تبعا لزاوية السقوط نتيجة تغير الانعكاسية مع الزاوية، إلا أن هذه الخاصية الطبيعية ليست كافية لاعتبار الزجاج ذو نفاذية اختيارية لزاوية السقوط، فمن الصعب على المصمم تحديد زوايا السقوط التى تحقق أعلى نفاذية، او تحديد زوايا الإظلال . ويعد الزجاج ذو نفاذية اختيارية إذا أصبحت نفاذيته للزوايا المطلوبة أعلى من نفاذيته لغيرها، كما تصبح نفاذيته للاشعة القادمة من اتجاه

زوايا الإظلال أقل من غيرها، وذلك بشكل يزيد على نفس الخاصية فى الزجاج العادى. ولتقييم انتقائية الزجاج يتم توصيف نفاذيته لاتجاه الاشعة بثلاث زوايا رئيسية هى:

زاوية الإظلال

هى زاوية السقوط التى لا ينفذ الضوء من لوح الزجاج إذا سقط عليه بزاوية أكبر منها

اتجاه المحور الضوئى الرئيسى

يعبر عنه بزاوية السقوط التى يتحقق عندها أعلى نفاذية للضوء

نطاق النفاذية

هو مجموعة زوايا السقوط المحيطة بالمحور الضوئى والتى ينفذ الضوء جزئيا إذا سقط بزاوية منها على الزجاج

وليمكن اعتبار الزجاج ذو نفاذية انتقائية يجب أن تتوافق الأهداف الثلاثة المذكورة مع الاهداف التصميمية له.

ويمكن تحقيق ذلك بعدة طرق يعرض جدول - ٢ أهمها:

جدول-٢ التقنيات المستخدمة فى الزجاج ذو النفاذية الاختيارية

أ - الزجاج المتجه غير المتجانس ضوئيا anisotropic	ب الزجاج المتجه المعتمد على الانعكاس	ج- كاسرات الشمس المدمجة
• الشوائب المتراصة مغناطيسيا • التبخير المائل • الحفر الضوئى لطبقة عاكسة	• الزجاج المنشورى • الزجاج المقطع بالليزر • الزجاج المجمع من شرائح متوازية • الزجاج المجمع من شرائح متجاورة	• التقطيع المتتابع عموديا • التقطيع المتتابع حلقيا • الشرائح المخدوشة طوليا • الزجاج ذو الزوايا المتغيرة

٢-١ الزجاج المتجه غير المتجانس ضوئيا

ويمكن تحقيق هذه الخاصية بعدة طرق أهمها:

١- الزجاج ذو الشوائب المتراصة مغناطيسيا:

فى هذا النوع من الزجاج، يتم إضافة مسحوق ناعم جدا من برادة الحديد أو أحد المواد القابلة للمغنطة إلى الزجاج أو البلاستيك السائل قبل تجمده، ويتم تعريض هذا اللوح أو الفيلم البلاستيكى لمجال مغناطيسى قوى فى اتجاه عمودى على سطح اللوح، مما يؤدى إلى تراص حبيبات المسحوق فى خطوط شبه منتظمه فى اتجاه مواز للمجال المغناطيسى، ويؤدى ذلك

إلى تكون ما يشبه الأرفف العموديه على اتجاه سطح الزجاج، تكون نفاذية الزجاج فى الإتجاه الموازى لهذه الأرفف (عموديا على الزجاج) أكبر من نفاذيته فى الإتجاه المائل على الزجاج وهذه الأرفف. (شكل-٨)

وهذه التقنية الحديثة (براءة اختراع عام ٢٠٠٢) لم تصل للإنتاج التجارى بعد، ومن غير المؤكد أن كانت ستصل لذلك أم لا، فهى شديدة الصعوبة وأكثر تعقيدا فى طريقة تصنيعها مما قد ينعكس على تكاليفها، كما أنه يصعب تحديد أبعاد واتجاهات هذه الأرفف شبه المنتظمة بدقة، وبالتالى يصعب تصميم خواص الزجاج بدقة.

٢- التبخير المائل للطبقة العاكسة:

وهى تقنية أخرى معقدة، تعتمد على طلاء الزجاج بطبقة عاكسة سميكة نسبيا ذات درجة حرارة إنصهار منخفضة، توضح بحيث تكون على السطح العلوى للزجاج الأفقى أو المائل بزاوية محسوبة، ويتم تعريض سطحها الأسفل لدرجة حرارة عالية بحيث تنصهر ثم يبدأ سطحها السفلى فى الغليان، تتصاعد فقاقيع الغاز لتفتح مسارات رأسية فى هذه الطبقة التى تصبح مسامية مع الوقت، وحين تبرد تبقى مسارات الغاز محفورة بها فى الإتجاه المحدد.

٣- الحفر الضوئى لطبقة عاكسة:

وهى تعتمد على فتح ثقوب فى الطبقة العاكسة عن طريق الحفر الكيميائى الضوئى، حيث يتم تغطية المعدن بطبقة تمنع نفاذ الأحماض المعدنية، ويتم تعريض هذه الطبقة للضوء من خلال فيلم فوتوغرافى يسمح بتعرض النقاط المطلوب حفرها للضوء، فيتغير تركيب المادة الحساسة للضوء وتصبح قابلة للذوبان فى الحمض، وبعد ذلك يوضع لوح الزجاج فى حمض قوى، تتآكل طبقة المعدن التى تآكلت الطبقة الحامية لها، وهذه هى الطريقة المعروفة باسم الزنكوغراف، وهى سهلة عمليا، ولكن يعيبها ارتفاع التكلفة من ناحية، وقلة عمق الطبقة التى يمكن حفرها مقارنة بمقاسات الفتحات المتوافقة مما يقلل من تأثير الإظلال .

فطبقات المعدن التى يتم طلاء الزجاج لها يكون سمكها [٣ – ١٠ ميكرون تقريبا]، وهو ما يعنى أن عرض الفتحة يجب أن يكون فى نفس الأبعاد تقريبا، وهو ما يصعب تحقيقه، فى عملية الحفر الكيميائى الضوئى.

أما استخدام سمك أكبر من المعدن فهو ممكن لكن يصعب تكوين طبقات بسمك ٥٠ ميكرون بالتبخير أو بالطلاء الكهربى، لذا يصبح من الضرورى استخدام أفلام من المعدن يتم حفرها ثم لصقها على الزجاج أو البلاستيك الشفاف، مما يعنى أن نسبة الفتحات يجب ألا تزيد كثيرا حتى لا يتمزق الفيلم المثقب عند تشغيله، ويمكن لصق المعدن على الزجاج قبل الحفر الكيميائى لتفادى ذلك، ويبقى حل مشاكل تفاعل الحمض مع المادة اللاصقة عند وصول الحفر لسطح الزجاج، حيث يجب أن تتآكل المادة اللاصقة لا إن تتفاعل بشكل يحولها إلى طبقة مشتتة أو ماصة للضوء.

والتقنية يمكنها نظريا أن تقدم حلا للمشكلة، لكن لا يزال هناك الكثير من الأبحاث التطبيقية التى يجب القيام بها لنجاحها، ويبقى إمكانية توظيفها مع تقنيات أخرى.

ب الزجاج المتجه المعتمد على الانعكاس

١- الزجاج المنشورى
(المرشحات المتجهة المعتمدة على الانعكاس الداخلى الكلى)

يتسم الزجاج بأن الأشعة المارة من داخله باتجاه الهواء تنعكس جزيئا عند التقائها بالسطح الفاصل بين الزجاج والهواء عندما تكون زاوية سقوطها قريبة من العمودية فينفذ جزء للهواء بعد انكساره، بينما ينعكس الباقى إلى داخل الزجاج مرة أخرى، وتتزايد الكمية المنعكسة إلى الداخل كلما زادت زاوية السقوط، حتى إذا وصلت إلى زاوية تسمى الزاوية الحرجة، [٤١ درجة بالنسبة للزجاج العادى] ينعكس كليا للداخل دون خروج شئ منه.
ويمكن الإستفادة من هذه الخاصية فى جعل الزجاج انتقائيا للضوء ويصمم سطحه الخارجى بطريقة تسمح بدخول الأشعة إلى الزجاج، ويصمم سطحه الداخلى بطريقة تعكس الزوايا غير المرغوبة. (شكل -٧)
ويمكن تصميم هذا النوع من الزجاج بسهولة لتحقيق انتقائية جيدة، ولكنه يعوق القدرة على الرؤية الخارجية مثل الزجاج الزخرفى، لذلك يصعب استخدامه فى النوافذ ويستخدم بكثرة فى فتحات الإضاءة العلوية وخاصة النوع المصنع من البولى كربونات، وهى نوع من البوليمرات التى تتميز بمتانتها وخفتها مقارنة بالزجاج.
كما يستخدم فى زجاج الواجهات فى الأجزاء التى لا يكون مطلوبا الرؤية بها [مثل الشراعات فوق منسوب الرؤية]. وقد سبق شرح أسلوب عمله عند شرح الانعكاس الداخلى الكلى.

٢- الزجاج المقطع بالليزر

هو ألواح من البلاستيك الشفاف يتم فتح خطوط أفقية متوازيه بها بتعريضها لأشعة ليزر قوية، فيتحول لوح الزجاج إلى مجموعة متتابعة من القضبان الزجاجية مربعة تقريبا، وتتسم هذه الألواح بنفاذ الأشعة العمودية على الزجاج سواءا من الفتحات أو من سطح الزجاج، أما الأشعة المائلة فتدخل فى سلسلة من الإنعكاسات الداخلية الجزئية أو الكلية تؤدى إلى إنعكاسها مرة أخرى للخارج، أو إنعكاسها للداخل جزئيا باتجاه السقف مما يحسن من الإضاءة الطبيعية. وهو يؤثر بشكل سلبى على وضوح الرؤية الخارجية وإن كان لا يمنعها تماما. (شكل -٩)
وعادة ما يتم حصر طبقة الزجاج المقطعة من لوحين من الزجاج لمنع تراكم الأتربة عليه.
وهذا النوع يتسم بسمات النوع السابق الذى يعتمد على الإنكسار الداخلى، وإن كان أعقد فى التصنيع بعض الشئ ويسبب هدرا فى المواد، حيث يتم صهر جزء من اللوح البلاستيك والتخلص منه، ويؤثر بشكل سلبى على وضوح الرؤية الخارجية وإن كان لا يمنعها تماما.

٣- الزجاج المجمع (الشرائح المتجاورة)

رغم الزجاج المقطع بالليزر يقابل بالاحتفاء من مؤسسات ترشيد الطاقة الأمريكية، إلا أنه يبدو من الأبسط تحقيق وظيفة النوع السابق بتكوين اللوح الزجاجى من قضبان مستطيلة متلاصقة من البلاستيك أو الزجاج، تنحصر بين لوحين من الزجاج العادى، وتعمل الأسطح العمودية على سطح الزجاج ككاسرات شمس نتيجة الانعكاس الداخلى للأشعة. كما يمكن التحكم فى خواص سطح القضيب الزجاجى بشكل أكبر أثناء التصنيع حيث يجب أن تكون السطحين الأمامى والخلفى شفافين، بينما يمكن أن يكون السطح العلوى ماصا أو مشتتا

للضوء، ويمكن أيضا أن يتم لصق القطاعات المربعة أو المستطيلة بمادة معتمة أو مشتتة بحيث تتحول مجموعة القضبان إلى لوح واحد يضم داخله الأرفف العمودية على سطحه، وهو ما يعنى تحوله إلى كاسرة شمس حقيقية مدمجة داخل الزجاج.
والفكرة تبدو أسهل أوفر فى المواد والطاقة والتكاليف، ومع ذلك لم تتطرق إليها أى من المراجع ولا براءات الاختراع التى تتناول الموضوع! فيبدو أن صعوبة المشكلة تدفع المصممين للتعامل مع الحلول المعقدة بدلا من التفكير فى الحلول البسيطة. ولذلك قام الباحثان بدراستها حسابيا كما سيرد تفصيلا فى القسم الثالث من البحث، مع اقتراح اجراء المزيد من البحث النظرى والعملى حول كفاءة هذه الفكرة. (شكل -١١، ١٢، ١٣)

٤- الزجاج المجمع من شرائح متتابعة

يمكن زيادة انعكاسية الزجاج بزيادة عدد الأسطح العاكسة ، فالزجاج العادى يعكس ٤% من الأشعة الساقطة عموديا على كل سطح (أى حوالى ٨% للسطحين)، فيما يعكس ١٥% عند زاوية سقوط 70° أى حوالى ٢٧% للسطحين، وعند إضافة لوح زجاج إضافى فى حالة الزجاج المزدوج، تصبح الانعكاسية العمودية حوالى ١٥% بينما تكون الانعكاسية لزاوية 70° حوالى ٥٢%، ويمكن بزيادة عدد آخر من الأسطح الشفافة غير المتلاصقة زيادة الانعكاسية بمتوالية هندسية. (شكل -١٠)

جدول ٢ **العلاقة بين النفاذية وعدد الطبقات الشفافة**

زاوية السقوط	النفاذيـــــة				
	طبقة واحدة	طبقتين	ثلاث طبقات	أربع طبقات	خمس طبقات
صفر(عمودى على اللوح)	٩٢%	٨٥%	٧٨%	٧٢%	٦٦%
٦٠ درجة	٨٦%	٧٤%	٦٤%	٥٥%	٤٧%
٧٠ درجة	٧١%	٤٩%	٣٤%	٢٤%	١٩%
٨٠ درجة	٣٤%	١١%	٠٤%	٠١%	٠ %

ويتم تحقيق ذلك تلقائيا عند استخدام الزجاج المزدوج مضيفا المزيد إلى فوائده، ويمكن زيادة التأثير بإضافة طبقة أو أكثر من الشرائح الرقيقة بين اللوحين لزيادة عدد الطبقات إلى ٤ أو ٥، حيث أن سمك الشريحة ليس هو المؤثر بقدر تأثير زيادة عدد الأسطح. ويمكن بذلك توفير الانعكاسية العالية المطلوبة باستخدام لوحين من الزجاج سمك كل منهما ٣ مم بينهما أفلام بلاستيك شفافة بسمك ٠,١ مم بحيث لا تغير من السمك الإجمالى بشكل ملموس فيصبح السمك الإجمالى ٦مم تقريبا، ويمكن بذلك تثبيته فى الإطارات العادية للزجاج المفرد.
وهو ما يمكن ملاحظته بسهولة عند النظر عبر بضعة شرائح شفافة من النوع المستخدم فى العرض بالفانوس Overhead Projector Transparencies حيث تقل شفافيتها بزيادة العدد رغم أنها رقيقة للغاية وشفافيتها عالية.

جـ كاسرات الشمس المدمجة

(المرشحات الضوئية الانتقائية للاتجاه)

وهى أشبه بكاسرات شمس مصغرة مدمجة داخل الزجاج أو فيلم شفاف ملصق عليه، تسمح بنفاذ الضوء فى اتجاهات معينة وتمنعه فى اتجاهات أخرى، حيث يمكن (ببعض الصعوبات التقنية) تصنيع ألواح من الزجاج أو البلاستيك تضم فى داخلها أسطحا معتمة عمودية عليها، تحول الزجاج إلى نوع من كاسرات الشمس.

ويمكن لتبسيط الفكرة تصور أن لوح الزجاج سيجمع بين قضبان زجاجية أو بلاستيكية مربعة (٣مم × ٣مم مثلا) يتم لصق كل منها فى أخر مجاور له بمادة لاصقة معتمة، بحيث تشكل فى النهاية لوحا سمكه ٣مم مخططا بالأسطح المعتمة ويتم تصميم هذه الكاسرة بطريقه تشبه تصميم الكاسرات العادية المتكررة، مع فارق أساسى سببه انكسار الضوء داخل الزجاج، كما سيرد تفصيليا فى القسم الثالث من البحث. (شكل -١٨)

وهذا اللوح الزجاجى يتميز بقدرة انتقائية عالية جدا تشبه تلك المميزة لكاسرات الشمس، ولكن يعيبه صعوبة الرؤية منه نتيجة قطع هذه الأرفف السوداء للرؤية، بشكل يشبه تأثير المشربية. وللتغلب على ذلك يتم تصغير هذا اللوح فى السمك وفى المساحة، بحيث تصغر الأرفف السوداء لدرجة أصغر من قدرة العين على التمييز بين الخطوط بسهولة، فيظهر الزجاج كأنه لوح رمادى غير مخطط، تتغير درجة لونه تبعا لاتجاه النظر. ولتصل دقة الخطوط إلى هذا الحد يجب أن تكون المسافة بين الخطوط أقل من ٠,١ مم وأن يكون سمكها فى نفس الحدود (أى أن تتشبه الخطوط القاطعة للزجاج تهشيرا شديد الضيق بقلم تحبير ٠,١ مم)، مما يعنى أن لوح الزجاج سيتحول إلى فيلم شفاف، سمكه حوالى ٠,١ مم (١٠٠ ميكرون) يماثل تقريبا سمك الشرائح الشفافة المستخدمة فى جهاز الإسقاط "Overhead Projector " وهو ما يزيد من صعوبة تصنيعه.

ويمكن نظريا تصغير هذه الكاسرات حتى ابعاد تقترب من ١٠ ميكرون (فى العمق أو المسافة البينية) رغم صعوبة تنفيذ ذلك عمليا، ، ولكن لا يجب أن تصغر عن هذا القدر حتى لا تشوه الرؤية نتيجة حدوث التداخل بين الموجات الناشئ عن ظاهرة الحيود، والى تبدأ تأثيراتها تقوى عندما تقترب أبعاد الفتحات من الطول الموجى للضوء (٠,٤ إلى ٠,٧ ميكرون). لذلك يبدو نطاق التعامل بين ٥٠ و ١٠٠ ميكرون هو الأكثر عملية.

ولكن بشكل عام تبدو هذه التقنية ملائمة للمعماريين الذين هم أقدر الناس على تطويرها، بحكم أنها أساسا طرق (جيومترية) للانتقاء، تعتمد على التصميم الفراغى للكاسرات أو المرشحات الضوئى، أكثر مما تعتمد على كيمياء المواد أو طرق تصنيعها.

وقد بدأ تطوير هذه المرشحات منذ الثلاثينيات لأغراض التصوير الفوتوغرافى وأجهزة وشاشات العرض السينمائى، ثم شاشات التليفزيون والشاشات الإلكترونية بشكل عام لزيادة وضوحها. وكانت دائما تواجه بصعوبة إدماج الكاسرات أو المرشحات داخل الزجاج، وهى الصعوبة التقنية التى تعوق انتشار هذا النوع من الزجاج،

وقد تعددت التقنيات لحل هذه المشكلة نذكر منها:

- التقطيع المتتابع عموديا
- التقطيع المتتابع حلقيا
- الشرائح المخدوشة طوليا
- الزجاج ذو الزوايا المتغيرة

ومعظم هذه التقنيات مرتفع التكاليف صالح للمسطحات الشفافة الصغيرة، حيث يصعب تطبيقه فى المسطحات الزجاجية الواسعة، بالإضافة لأن هذه التقنيات غير معروفة تقريبا للمعماريين، حيث كانت معظم تطبيقاتها القديمة والحديثة فى مجالات غير معمارية. رغم إمكانية تطبيق بعضها معماريا بتعديلات طفيفة، بينما بعضها بحاجة لتطوير جذرى.

والسطور التالية تعرض بعض هذه التقنيات التى تم التعرف عليها بالبحث فى براءات الإختراع الدولية، خلال المائة عام الماضية، بالإضافة لمواقع شركات الإلكترونيات.

١- التقطيع المتتابع عموديا:

وهذه الفكرة مسجلة براءة اختراع لمهندس فرنسى منذ عام ١٩٣٠ بهدف استخدامها فى مرشحات شاشات التليفزيون، وهى تكوين الفيلم الشفاف بالخطوات التالية:

١- يتم رص طبقات من الشرائح الشفافة المربعة أفقيا فوق بعضها، مع لصق كل منها بالأخرى بمادة لاصقة معتمة، ويتم لصق عدد كبير من هذه الشرائح حتى يبلغ سمك الرصة قيمة تساوى طول ضلع الشريحة لتكون مكعبا من الشرائح المتتابعة.
٢- بعد جفاف المادة اللاصقة يتم تقطيع المكعب فى اتجاه عمودى على اتجاه الرص الأصلى (رأسيا) إلى شرائح، بحيث يساوى سمك الشريحة الجديدة السمك الأصلى للشرائح الأصلية، فتصبح هذه الشرائح مخططة داخليا بأسطح افقية عمودية على الشريحة الجديدة وتصبح جاهزة للاستخدام ككاسرات أفقية وراسية.
٣- فى حالة الرغبة فى عمل كاسرات مركبة من خطوط أفقية ورأسية، يتم لصق الشرائح التى تم تقطيعها مرة أخرى بنفس المادة اللاصقة المعتمة لتكوين مكعب من جديد.
٤- يتم تقطيع المكعب مرة أخرى فى اتجاه متعامد على اتجاه القطع السابق وعلى اتجاه الشرائح الأصلية، فتصبح الشرائح الناتجة الجديدة مقطعة داخليا بأسطح متعامدة على سطحه. (شكل -١٥)

وهذه الطريقة تتسم ببساطة وكفاءة تقترب من العبقرية، خاصة أنها مطورة منذ ٧٠ سنة. وإن كان لا يوجد أى معلومات عن مدى تطبيق هذه الفكرة تجاريا.

فهناك صعوبات تواجه تصنيعها تتمثل فى عدة عوامل:

١- إمكانية تحمل المادة اللاصقة للقطع الميكانيكى للشرائح دون تفككها من بعضها.
٢- إمكانية قطع طبقة رقيقة بسمك منتظم رقيق.
٣- جودة سطح الشرائح بعد التقطيع، وخاصة أن هذا السطح يجب أن يكون شفافا تماما ومنتظما بدرجة لا تشوه نفاذ الضوء – وهو أمر صعب إلا إذا تم صقل هذا السطح، أو

تم لصق هذه الشريحة بين شريحتين من نفس المادة بمادة لاصقة شفافة لها نفس معامل الانكسار لمادة الشريحة الأصلية.

ومن الواضح أن هذه الفكرة انقطعت عملية تطويرها، فى مجالها الأصلى، لأن مخترعا يابانيا تقدم بطلب تسجيل براءة لاختراع مشابه فى عام ٢٠٠٤، لم يتم منحه البراءة بعد، وإن كان المخترع اليابانى لم يغطى كل جوانب الفكرة الأصلية، لأنه يستخدمها فقط فى تصميم شاشات عرض ضوئى تستخدم فى تابلوه السيارات.

ويمكن محاولة حل المشاكلها التقنية لهذه الطريقة وتوظيفها معماريا لتصنيع ألواح من الزجاج ذات قدرة عالية على الانتقائية لزاوية السقوط.

٢- التقطيع المتتابع حلقيا

وقد سجلت فكرة حديثة لتقنية مقاربة، تعتمد على لف الفيلم بشكل اسطوانى مع لصقه بمادة لاصقة معتمة ، ثم تقطيعه عموديا على محور الأسطوانة لإنتاج شريحة دائرية شفافة بها أقواس معتمة، يتم تقطيع الشريحة إلى أربع أجزاء، يتم وضع كل جزئين فوق بعضهما بحيث تتعامد أقواس كل منهما على الآخر وتنتج شبكة شبه متعامدة. (شكل -١٦)

وهذه الطريقة لا تقدم ميزة على الطريقة السابقة بالنسبة للتطبيقات المعمارية، وإن كانت أسهل فى التنفيذ نسبيا على المستوى الصناعى، ولها تطبيقات مفيدة فى الإضاءة الصناعية.

٣- الأفلام المخدوشة طوليا:

ويتم تصنيع رف داكن داخل الشريحة عن طريق خدشها عموديا على سطحها لعمق يقارب نصف سمكها، ثم ملئ الخدش الناتج بمادة معتمة، ويتم عمل مجموعة من الخدوش المتوازية على السطح، ولزيارة عمق الرف يمكن لصق شريحتين متقابلتين بحيث يتضاعف سمك الرف الذى يصبح معلقا فى منتصف الشريحة المجمعة بلصق الشريحتين المخدوشتين، ويمكن أيضا تصنيع الشرائح من البداية وهى معرجة أو بها تجاويف يتم دهانها أو ملئها بعد ذلك بالمادة المعتمة. (شكل -١٤)

وهذه الطريقة بسيطة ولا يبدو أمامها مشاكل تقنية معقدة تصعب من تنفيذها وترفع تكاليفه، ولكن لها عيبين بسيطين:

١- عدم وجود حرية فى تحديد سمك الرف الأفقى وصغر عرضه، وبالتالى الاضطرار لتقريب المسافة بين هذه الأرفف ليمكن إعاقة الضوء المائل، وهو ما يقلل من الشفافية للضوء العمودى، ويقلل الانتقائية بالتالى.

٢- إمكانية عمل خطوط فى اتجاه واحد حيث أن خدش الشريحة فى الاتجاه المتعامد عملية صعبة إلى حد كبير ويمكن أن تمزق الشريحة، إلا إذا تم تصنيعها من البداية بواسطة درافيل غير مسطحة تطبع عليها النسق الهندسى المطلوب.

٤- الزجاج ذو زوايا الإظلال المتغيرة

يمكن باستخدام مادة مرنة شفافة كوسط للكاسرات المدمجة بين لوحى الزجاج الأصليين تحقيق ميزة إضافية للزجاج، وهى تغير زوايا الإظلال اختياريا، فى وضع يشبه كاسرات

الشمس المتحركة، بحيث يمكن زيادة نفاذية الزجاج أو تقليلها تبعا للحاجة.
ويكون التحكم عن طريق تحريك أحد لوحى الزجاج حركة بسيطة فى مستوى موازى لسطحه، فيتغير شكل المادة المرنة الفاصلة بين اللوحين وبالتالى تتغير زاوية ميل الكاسرات على سطح الزجاج. (شكل -١٧)
ويمكن أن تكون الحركة ميكانيكية مباشرة عن طريق رافعة يحركها المستخدم، أو أن تتحرك كهربيا بواسطة مرحل حركة كهربى بسيط Relay يجعل تغيير النفاذية قابلا للتحكم الكهربى، سواء التحكم المباشر من المستخدم، أو بواسطة أى نظام ذكى للتحكم.

٣- تصميم كاسرات الشمس المدمجة داخل الزجاج

تشبه عملية تصميم كاسرات الشمس المدمجة داخل الزجاج تصميم كاسرات الشمس العادية فى معظم الجوانب، حيث يتم تحديد زوايا السقوط المطلوب السماح بها وتلك المطلوب منعها بناءا على تحليل البيانات المناخية للموقع لتحديد الفترات الحارة التى يكون مطلوبا فيها منع الإشعاع الشمسى، والفترات الباردة التى يجب السماح لأشعة الشمس بالمرور، وبناء على ذلك يتم تحديد زاوية الإظلال للكاسرة وبالتالى أبعادها.

ولكن يختلف تصميم كاسرات الشمس داخل الزجاج أو البلاستيك الشفاف عن تصميم كاسرات الشمس العادية، وذلك فى عدة جوانب أهمها:
اختلاف الزوايا التصميمية
اختلاف نسبة الإشعاع الواصل للكاسرات
اختلاف سلوك الأشعة التى تحجبها كاسرات الشمس

ولتوضيح ذلك ، تتناول السطور التالية شرحا لهذه الاختلافات والأسس العلمية للظواهر الفيزيائية والجيومترية التى تسببها، مع الاستعانة بمثال تطبيقى يجسد هذه الاختلافات. وهو مثال لكاسرة شمس تقليدية متعددة الرياش تقع فى الواجهة الجنوبية لمبنى فى القاهرة، مصممة لتسمح بنفاذ أشعة الشمس شتاءا وتمنعها صيفا.

تصميم الكاسرة التقليدية
من المعتاد استخدام كاسرة شمس أفقية فى الواجهة الجنوبية، يمكن أن تكون رفا أو مظلة أفقية فوق النافذة، يكون بروزها كافيا لمنع زاوية الشمس المرتفعة صيفا من المرور، دون أن يعيق نفاذ الأشعة المنخفضة شتاءا. أو أن تكون عددا من الرياش الأفقية المتتابعة التى تقسم النافذة إلى مجموعة من النوافذ الصغيرة، تمثل كل ريشة مظلة لها (شكل-١٨) بحيث تؤدى نفس المهمة.
فزاوية سقوط أشعة الشمس يوم ٢١ يونيو هى ٨٣ º بينما زاوية سقوطها شتاءا (٢١ ديسمبر) ٣٧ º ، ومن المعتاد استخدام هاتين الزاويتين لشرح فكرة عمل كاسرات الشمس فى الواجهة الجنوبية، فإذا كانت الكاسرة ذات بروز يسبب زاوية إظلال ٨٣ º فستنجح فى منع نفاذ الأشعة

يوم ٢١ يونيو، ولكن الصيف كله ليس ٢١ يونيو، فالفترة ذات النهار الحار فى القاهرة تبدا من مايو وتمتد إلى أكتوبر، وهى الفترة التى يجب فيها حماية الواجهات من نفاذ الإشعاع الشمسى المباشر، وتكون زاوية سقوط الشمس خلالها أقل كثيرا من ٨٣ º، فزاوية ارتفاع الشمس فى أكثر شهور الصيف حرارة وهو أغسطس تبلغ ٦٧ º ولذا يكون المعتاد استخدام كاسرات ذات زاوية إظلال ٦٠ º وهى زاوية سقوط الشمس فى كل من ٢١مارس و٢١ سبتمبر. فرغم أن شهر أكتوبر ذو نهار حار يحتاج إلى إظلال ، وأن زاوية سقوط الشمس خلاله تكون فى حدود ٤٨ درجة، إلا أن تقليل زاوية الإظلال لهذا الحد يمكن أن يمنع نفاذ أشعة الشمس فى فبراير، وهو شهر يتسم بالبرودة ويحتاج لنفاذ أشعة الشمس، لذا يبدو من الملائم استخدام زاوية ٦٠ º كحل وسط، ورغم ضرورة إجراء حساب دقيق للزاوية التى تحقق أقل استهلاك للطاقة بالمبنى صيفا وشتاءا، إلا أن هذا يخرج عن هدف البحث، الذى يستخدم هذا الرقم لغرض المقارنة بزوايا الإظلال التصميمية لكاسرات الشمس داخل الزجاج.

الزوايا التصميمية

حين يمر الضوء إلى داخل الزجاج ينكسر فتتغير زاوية مروره داخل الزجاج عن زاوية سقوطه، أما حين يخرج من الزجاج فإنه ينكسر مرة أخرى ليخرج فى اتجاه يوازى مساره الأصلى، ويعنى هذا أن الكاسرة داخل الزجاج يجب أن تعترض زوايا مختلفة عن زاوية حركة الضوء فى الهواء، وهى زوايا تختلف تبعا لقانون سنيل.

فعلى سبيل المثال لو أردنا تصمم الكاسرات الشمسية العادية لتحقيق زاوية إظلال ٦٠ º ، فهذا يعنى أن رياش الكاسرة يجب أن تبعد عن بعضها مسافة تساوى عرض الكاسرة × ١,١٥ (1/ sin 60) لتعوق شعاعا له زاوية سقوط ٦٠ º، ولكن فى حالة الكاسرات المدمجة ينكسر الشعاع بمجرد دخوله إلى الزجاج، وتكون زاوية الانكسار ٣٥ º ، وهو ما يعنى أن الشعاع سينفذ من بين رياش الكاسرة إذا كانت المسافات بينها لا تزال مساوية لقيمتها الأصلية، ولتمنع الكاسرة المدمجة أشعة الشمس من النفاذ، يجب أن تصمم لتحقيق زاوية إظلال ٣٥ º. (شكل-١٨) .

مثال تطبيقى: كاسرة شمس مدمجة من الزجاج المجمع من شرائح متجاورة.

إذا اخترنا الزجاج المجمع كتقنية لتنفيذ كاسرة الشمس، يمكن استخدام لوح من الأكريليك الشفاف (البلكسى جلاس) بسمك ٣مم يتم تقطيعه إلى شرائح سمك كل منها ٢,١ سم (بحيث تكون زاوية الإظلال الداخلية ٣٥ º)،

ويمكن بسهولة إعادة لصق الشرائح بمادة لاصقة معتمة (غراء أكريليك مع أكسيد اسود) بحيث تتحول إلى أرفف عمودية على سطح الزجاج. مشكلة لوحا ذو نفاذية انتقائية لاتجاه الضوء يقوم بدور كاسرات الشمس فى الواجهة الجنوبية. (شكل-١٢جـ)

يمكن أن يتم تجميع اللوح بدون اللصق بمادة معتمة، بحيث يعمل هذا الزجاج بالاعتماد على الانعكاس الداخلى الكلى (شكل ١٢-ب) وذلك إذا كانت الأسطح الأفقية مصقولة وعاكسة، بحيث تنعكس الأشعة المباشرة ذات زاوية السقوط الاعلى من زاوية الإظلال إلى السقف،

ويقتضى ذلك صقل أسطح الأكريليك المقطعة (يمكن الصقل بصنفرة ناعمة ثم قماش صوفى مع مادة تشطيب مثل البوليش المستخدم للسيارات) أو استخدام قطاعات جاهزة مستطيلة مشكلة بالبثق إذا توافر المقاس المطلوب، ولا يتم لصق الشرائح بكامل طولها بل لصق الأطراف فقط بحيث تبقى أسطح التجميع نظيفة، ويفضل تجميع الشرائح بين لوحين من الزجاج أو الأكريليك. وكما سبق الذكر، يفيد هذا النوع فى الإضاءة الطبيعية لأنه يعكس الإشعاع الشمسى المباشر إلى السقف، لكن يمكن أن يسبب الإبهار، لذا يفضل أن يستخدم فى زجاج النافذة فوق منسوب ١٨٠ سم، مع استخدام النوع الأول لباقى النافذة، مع ملاحظة إمكانية استخدام النوعين فى لوح واحد بدون وجود فارق ظاهر بينهما فى شكل السطح الخارجى.

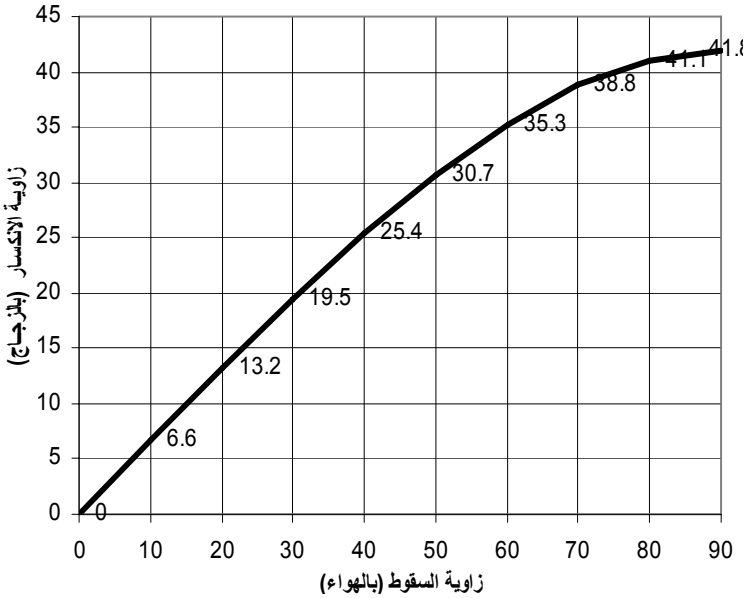
النتائج

- الزجاج ذو الانتقائية لزاوية السقوط يحمل فرصة عالية للنجاح فى توفير الطاقة تماثل تلك التى لكاسرات الشمس مع التخلص من عيوبها. ولا يزال انتاجه من التحديات الرئيسية التى تواجه العلم فى مجال العمارة الشمسية، ومجال البحث فيها مفتوح.
- هناك طرق ذات تكنولوجيا عالية للوصول لزجاج ذو انتقائية لزاوية السقوط، مثل الحبيبات المتراصة مغناطيسيا أو التبخير المائل للطبقة العاكسة، وهى طرق معقدة يتم تنفيذها أثناء تصنيع الزجاج، ولا تزال حتى الآن محل البحث ولم تصل للإنتاج التجارى بعد.
- هناك عدة طرق بسيطة لتحقيق الانتقائية اعتمادا على الانعكاس الجزئى مثل الطبقات المتتابعة من الأفلام الشفافة، يعيبها أن زوايا النفاذ تحددها الخواص الطبيعية للمادة (نفاذ الأشعة العمودية بنسب أعلى من المائلة) ويصعب التحكم بها تصميميا.
- الاعتماد على الانعكاس الداخلى الكلى يتيح تحكما جيدا فى زوايا الاظلال والنفاذ، ولكنه يسبب مشاكل فى الرؤية من النافذة، فالزجاج المنشورى يعيق الرؤية تماما، بينما الزجاج المجمع على التوازى يسبب الابهار عند سقوط الاشعاع الشمسى المباشر عليه
- كاسرات الشمس المدمجة داخل الزجاج تحقق الانتقائية الكاملة التى تسمح بها الكاسرات العادية، بينما تتخلص من عيوبها المتمثلة فى التأثير على شكل الواجهات والفراغ الذى تشغله وصعوبة الصيانة والتنفيذ.
- يمكن للمعماريين تصميم كاسرات الشمس المدمجة داخل الزجاج بنفس طريقتهم المعتادة فى تصميم كاسرات الشمس العادية، مع الاخذ فى الاعتبار تغير الزوايا التصميمية نتيجة انكسار الضوء داخل الزجاج.
- الفكرة التى يطرحها البحث باستخدام الزجاج المجمع من قضبان شفافة متوازية تسمح بفرصة جيدة للاستخدام كموجه للاضاءة الطبيعية إذا اعتمدت على قضبان متماسة غير متلاصقة، كما يمكن أن تستخدم ككاسرة شمس مدمجة داخل الزجاج إذا تم لصق القضبان بمادة معتمة تكون أرفف عمودية على سطح لوح الزجاج، ولكنها تحتاج إلى المزيد من البحوث العملية.
- يمكن استخدام القضبان المجمعة كمساعد تصميمى للمعماريين لاعداد النماذج التجريبية للكاسرات المدمجة للتحقق من الأداء قبل الانتاج التجارى بالطرق الصناعية.

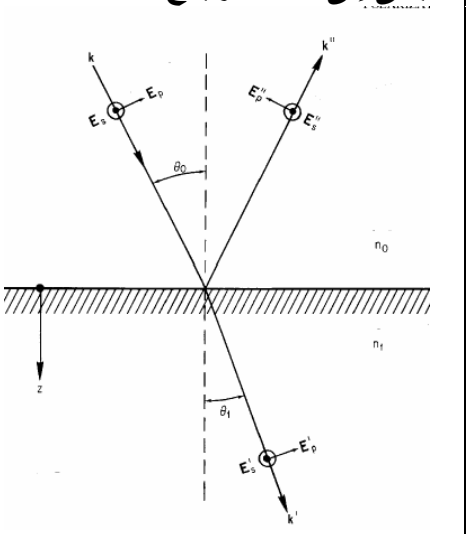
التوصيات

- على المعمارى المتخصص فى العمارة البيئية الفهم الدقيق للجوانب الفيزيائية المتعلقة بانتقال الحرارة والضوء ليمكنه فهم التطورات الحديثة والمساهمة فيها، والمفاضلة بين ملائمة أنواع الزجاج لمهمة معينة، وليمكنه اعطاء النصيحة المتخصصة لغيره من المعماريين.
- يمكن للمعماريين المساهمة فى تطوير الزجاج بدلا من ترك المهمة لمهندسى المواد، وذلك بالتركيز على البحث فى مجال الزجاج ذو الانتقائية لزاوية السقوط، نظرا لخبرتهم فى تصميم كاسرات الشمس. حيث يمكنهم اضافة اضافات علمية جديدة فى هذا المجال
- اجراء المزيد من البحوث على طرق تصنيع كاسرات الشمس المدمجة داخل الزجاج بطرق تصلح للانتاج المحلى والانتاج على قياس صغير للتحقق من جدوى استخدام هذا النوع من الزجاج قبل انتاجه على قياس كبير واضافته إلى كودات ترشيد استهلاك الطاقة.

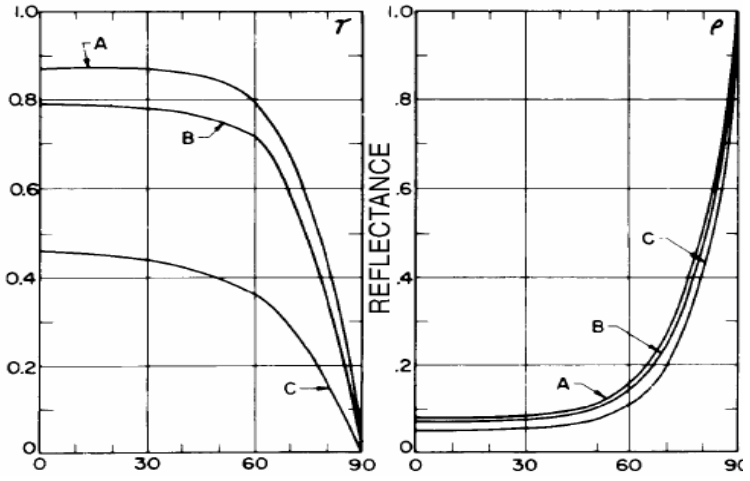
شكل – ١
العلاقة بين زاوية السقوط وزاوية الانكسار فى الزجاج العادى n'=1.5



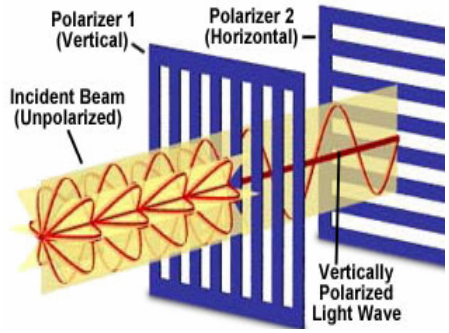
شكل-٢ الانعكاس الجزئى
ينعكس جزء من الشعاع الساقط على سطح الزجاج الخارجى وينكسر الباقى إلى داخل الزجاج



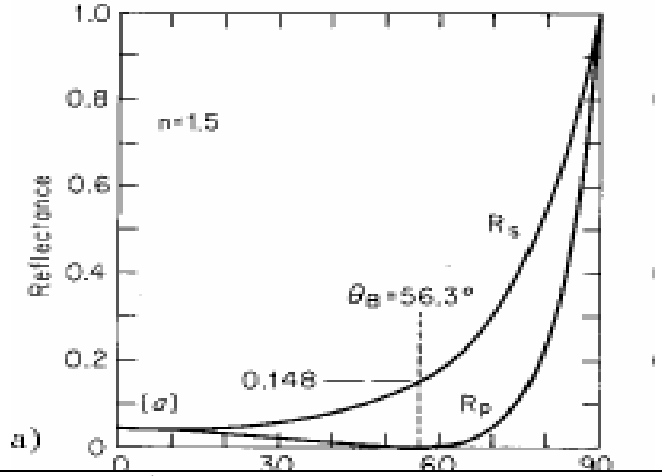
شكل-3 العلاقة بين الانعكاسية والنفاذية وزاوية السقوط للزجاج العادى (A)



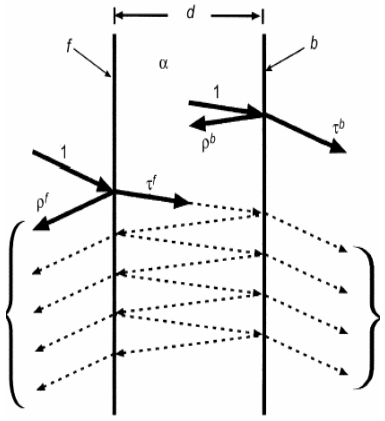
شكل-٤ الفارق بين الضوء العادى عدة مستويات للتموج)، والمستقطب (مستوى واحد للتموج)



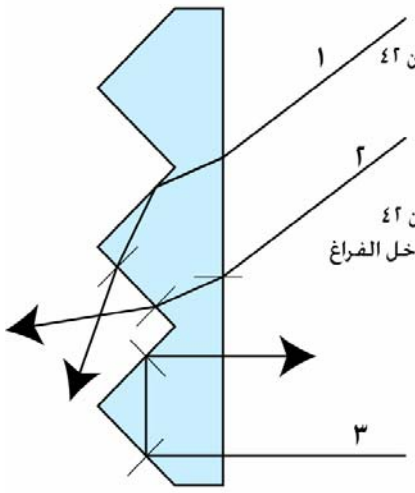
شكل-٥ العلاقة بين انعكاسية الزجاج وزاوية السقوط لكل من اتجاهى الاسقطاب بالنسبة للزجاج العادى



شـــكل -٦ الانعكـــاس الـــداخلى المتكرر



شكل-٧ الانعكاس الداخلى الكلى فى الزجاج المنشورى

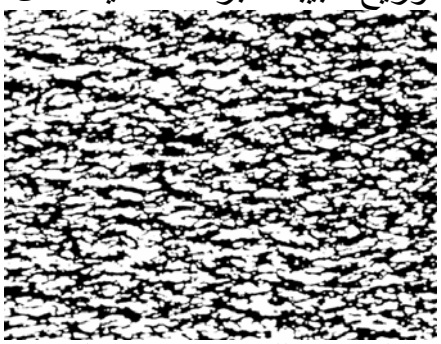


١ - شعاع مائل على الزجاج
ينكسر عند دخوله ويسقط على السطح الداخلى بزاوية تزيد عن ٤٢
فينعكس انعكاسا داخليا كليا متجها إلى سطح داخلى أخر
بزاوية تقل عن ٤٢ فينكسر مرة أخرى لينفذ إلى داخل الفراغ

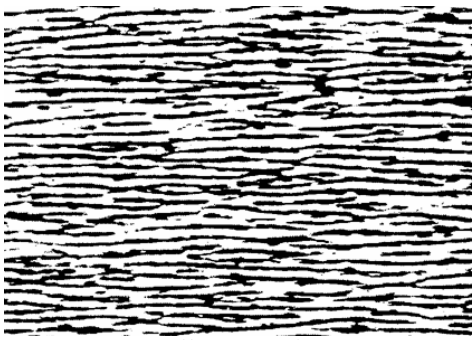
٢ - شعاع مائل على الزجاج
ينكسر عند دخوله ويسقط على السطح الداخلى بزاوية تقل عن ٤٢
فلا ينعكس انعكاسا داخليا كليا وينكسر مرة أخرى لينفذ إلى داخل الفراغ
يلاحظ أنه يوازى الشعاع السابق ومع ذلك خرج بزاوية مختلفة،
مما يعنى تشوه المنظر الخارجى

٣ - شعاع عمودى على الزجاج
ينعكس انعكاسا داخليا كليا مرتين
ثم يعود للخارج دون أن ينفذ من الزجاج

شكل-٨ صورة ميكروسكوبية لقطاع فى الزجاج ذو الجزيئات المتراصة مغناطيسيا يوضح توزيع حبيبات برادة الحديد داخل الزجاج



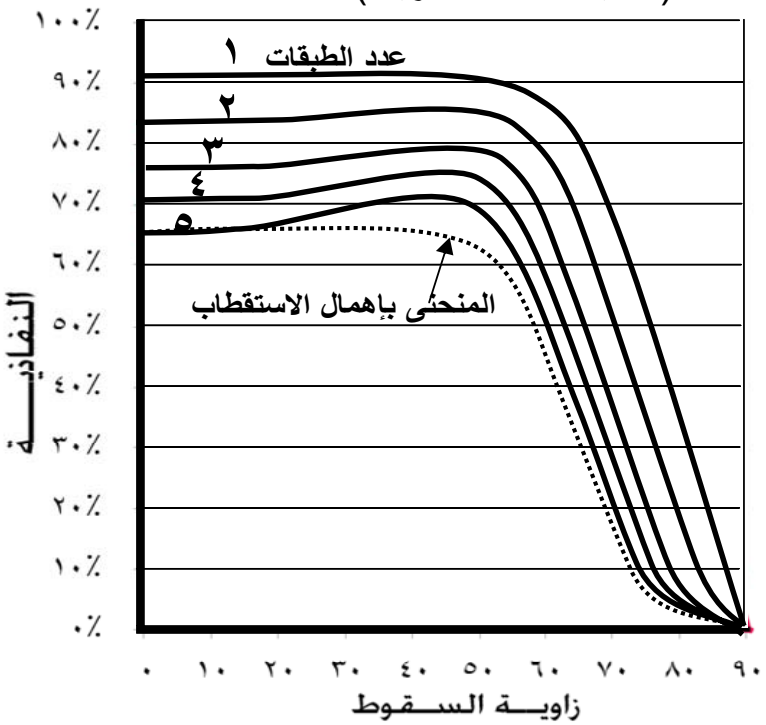
أ- التوزيع الطبيعى للحبيبات بدون التعرض لمجال مغناطيسى



ب- التوزيع شبه المنتظم للحبيبات عند التعرض لمجال مغناطيسى قوى

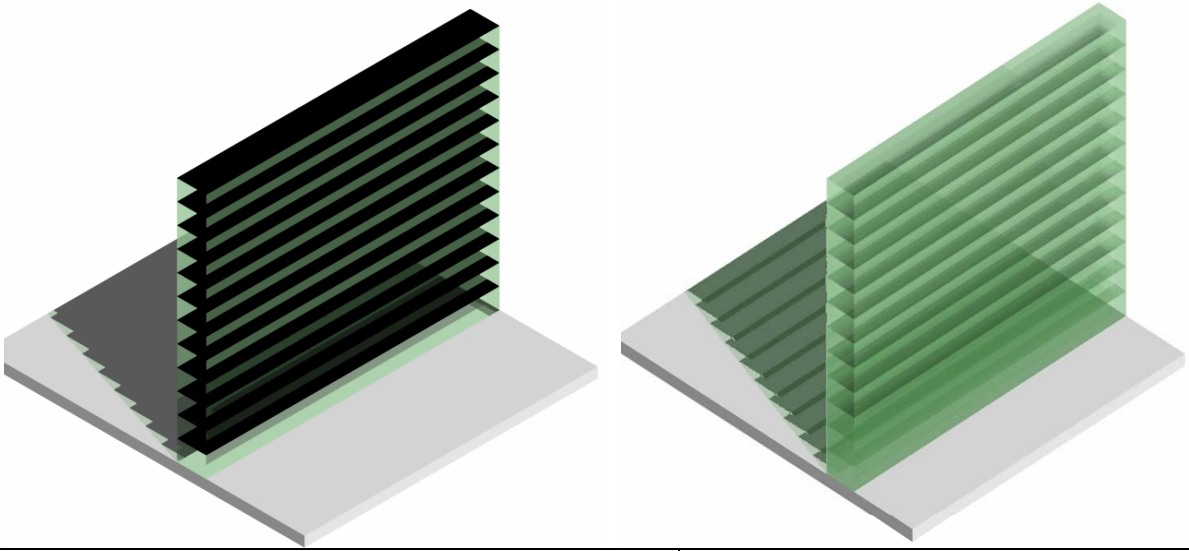
شكل-٩ الزجاج المقطع بالليزر

شكل-١٠ العلاقة بين النفاذية وعدد الطبقات الشفافة
(تمثيل لمعادلات فرينل)



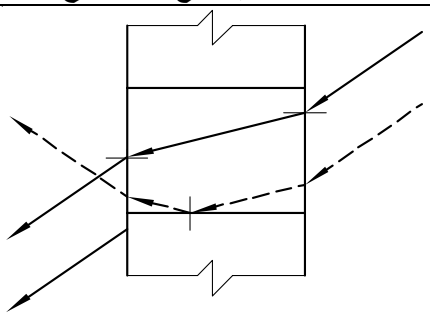
شكل-١١ قضبان البلكسى جلاس (الأكريليك الشفاف) يمكن تجميع لوح الزجاج منها

شكل-١٢ تجميع لوح الزجاج من مجموعة من القضبان المتجاورة، دراسة شكل الإظلال باستخدام برنامج التمثيل ثلاثى الأبعاد VectorWorks

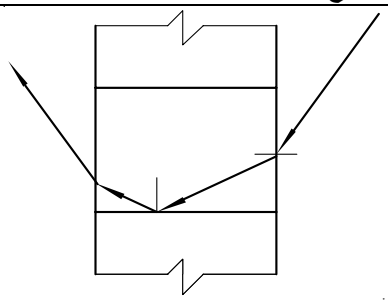


أ- تكوين أسطح داخلية عمودية على سطح لوح الزجاج تمنع نفاذ الاشعة المباشرة بسبب الانعكاس الداخلى الكلى	ب- يمكن لصق هذه القضبان بمادة معتمة تمنع نفاذها بالامتصاص

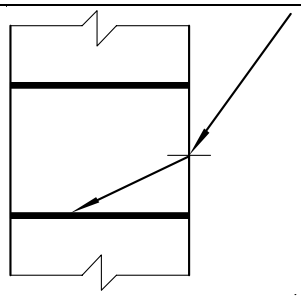
شكل-١٣ نفاذ الإشعاع عبر لوح زجاجى مجمع من القضبان المتجاورة



الشعاع ذو زاوية السقوط المنخفضة يمرللداخل فى اتجاهه الأصلى بعد انكساره مرتين، ولكن نسبة قليلة من الاشعة تنعكس للداخل بعد تغيير اتجاهها، مسببة الابهار إذا توجهت لعين المستخدمين. لذا يفضل استخدامه فى النافذة فوق مستوى النظر.

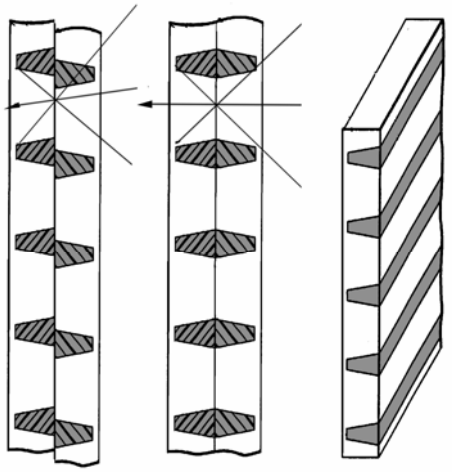


الشعاع ذو زاوية السقوط الأكبر من زاوية الإظلال ينكسر ثم ينعكس كليا من السطح السفلى للقضيب الشفاف، فينفذ موجها الاشعة إلى السقف، فيحسن الاضاءة الطبيعية، لتفادى الابهار يفضل استخدامه فى النافذة فوق مستوى النظر.

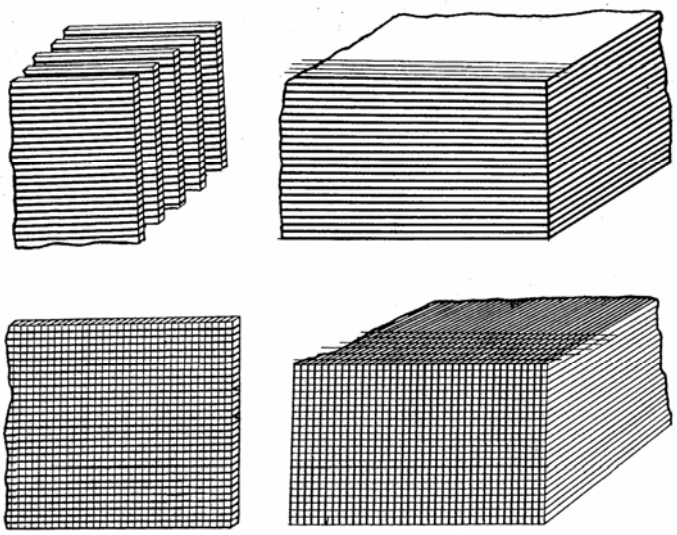


طلاء الاسطح الأفقية للقضبان بمادة ماصة للضوء يوقف انعكاس الأشعة المرتفعة، ويمنع انعكاسها للداخل، حيث يعمل ككاسرة شمس مدمجة داخل الزجاج، يفضل استخدام هذا النوع فى مستوى النظر

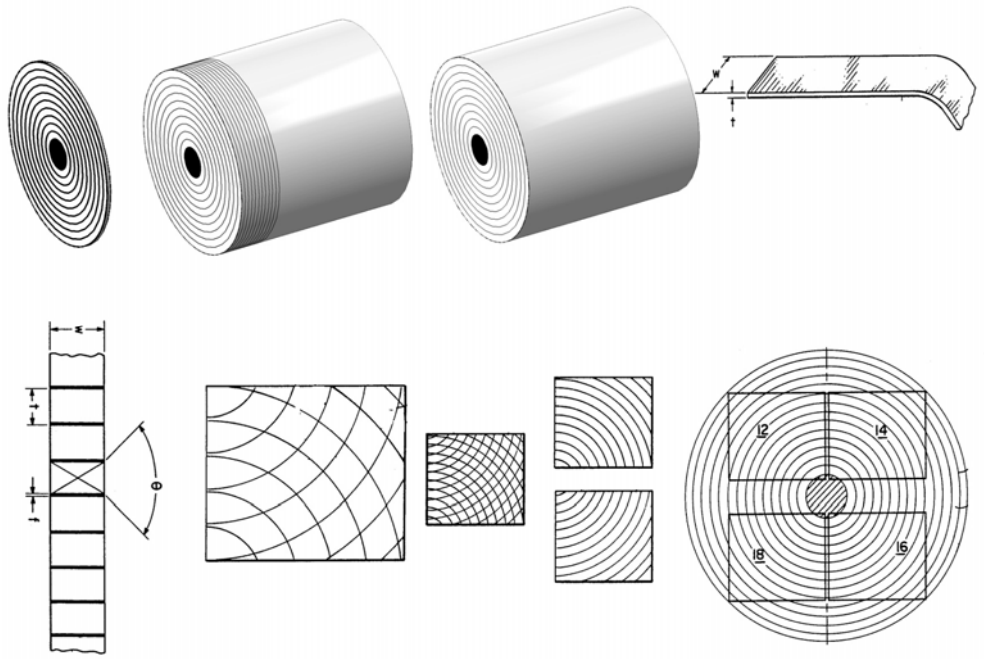
شكل-١٤ تشكيل كاسرات الشمس المدمجة بالخدش العميق للأفلام الشفافة



شكل-١٥ تشكيل كاسرات الشمس المدمجة بالتقطيع المتتابع عموديا



شكل-١٦ تشكيل كاسرات الشمس المدمجة بالتقطيع المتتابع حلقيا



يتم لف الغشاء الشفاف بشكل اسطوانة بحيث تلتصق كل طبقة فى الأخرى بمادة لاصقة معتمة ثم يتم قطع شرائح رقيقة متوازية من وجه الأسطوانة فتحتوى كل منها على حلقات معتمة رفيعة عمودية على سطح الشريحة

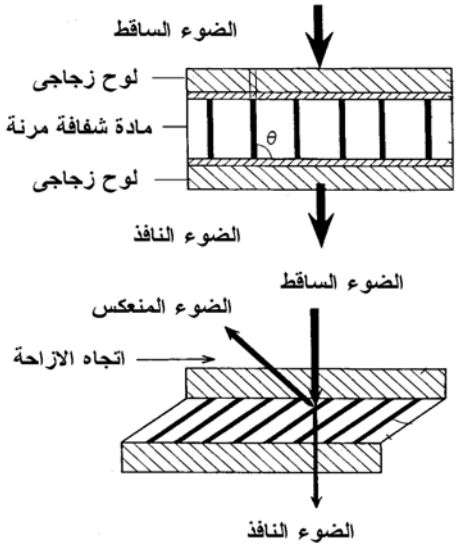
يتم اختيار مربعات من الشريحة المقطوعة وتوضع شريحتين فوق بعضهما فى وضع يسمح بتعامد الحلقات المعتمة لتكون الشريحة النهائية الناتجة كاسرة شمس متقاطعة ذات فتحات مربعة تقريبا تسمح بمرور الإشعاع العمودى على الزجاج وتمنع مرور الأشعة ذات زاوية السقوط الكبيرة.

شكل- ١٧

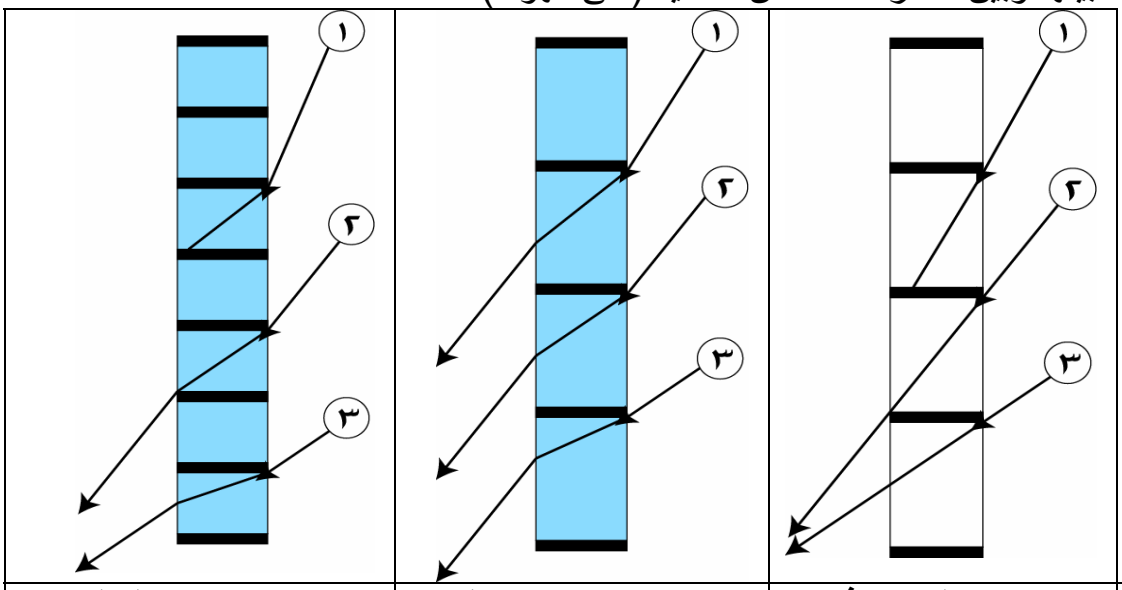
أ- لوح الزجاج فى الوضع العادى،

الكاسرات المدمجة عمودية على سطح الزجاج فيكون منفذا لمعظم الأشعة الساقطة عموديا.

ب- لوح الزجاج عند تعرضه لاجهاد قص يسبب ازاحة عرضية طفيفة تغير من زوايا الكاسرات المدمجة، الزجاج يصبح معتما تماما للأشعة الساقطة العمودية عليه.



(شكل-١٨) . الزوايا التصميمية لكاسرات الشمس المدمجة داخل الزجاج والفارق بينها وبين كاسرات الشمس العادية (فى الهواء)



الشعاع رقم	زاوية السقوط	كاسرات الشمس فى الهواء	كاسرات شمس داخل الزجاج مصممة خطأ (بنفس زوايا الإظلال للكاسرة العادية)	كاسرات شمس داخل الزجاج مصممة بشكل سليم (زوايا الإظلال الداخلية تعترض الشعاع بعد انكساره)
١	٧٠	لا يمر لأنه يسقط بزاوية أكبر من زاوية الإظلال	يمر لأنه ينكسر وتصبح زاوية انكساره أقل من زاوية الإظلال الداخلية	لا يمر لأنه يسقط بزاوية أكبر من زاوية الإظلال الداخلية
٢	٦٠	يسقط بزاوية الإظلال	يمر لأنه ينكسر وتصبح زاوية انكساره أقل من زاوية الإظلال الداخلية	يسقط بزاوية الإظلال الخارجية وينكسر بزاوية الظلال الداخلية
٣	٥٠	يمر لأنه يسقط بزاوية أقل من زاوية الإظلال	يمر لأنه يسقط بزاوية أقل من زاوية الإظلال	يمر لأنه يسقط بزاوية أقل من زاوية الإظلال الداخلية

المراجع

1- Michael Basset al.: Handbook Of Optics, Volume I,Fundamentals , Techniques ,and Design, McGraw-Hill, New York, 1995.

2- ASHRAE, American Society for Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers : Handbook of Fundamentals, ASHRAE, NewYork , 2001.

3- Jenkins and White: Fundamentals of Optics,
McGraw-Hill, Tokyo, 1957

4- Eleanor Lee et al.: High-Performance Commercial Building Façades, LBNL-50502, Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, June 2002

5- Mortimer Abramowitz - Olympus America,, Microscopy Resource center: **Polarization of Light**, **2007**
http://www.olympusmicro.com/primer/lightandcolor/polarization.html

6- R. Sullivan, L. Beltran, E.S. Lee, M. Rubin, and S.E. Selkowitz: Energy and Daylight Performance of Angular Selective Glazings, LBNL-41694, *Proceedings of the ASHRAE/DOE/BTECC Conference, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VII, Florida, December 7-11,* ***1998***

7- E. F. Tokas et al.: Light control Films and methods of Making, US Patent Number 5,104,210, April 1992

8- Ritchard Cohen: Directional Filter for filtering Ambient light, US Patent no. 4553818, Nov 1985.

10- Hiroaki Tada et al, Light Controlling Device and Process For Controlling Light Transmission, United states patent no. 5,296,974 1994

11- Eugene Astima: Shadow Producing screen for luminous Projections and other Applications and Process for its manufacturing, Us patent 2,053,173, may 1931, Fraench Patent 536,618 , may 1930

12- Rayemond Chiu el al. : Light Control Device, Us Patent Number 6,398,370 b1, June 2002