مؤتمر قسم الهندسة المعمارية ٢٠٠٦
كلية الهـــــندسة – جامعة القـــــاهرة
د. عباس محمد الزعفرانى مدرس بكلية التخطيط العمرانى جامعة القاهرة
أ.م.د. أحمد أحمد فكرى أستاذ مساعد بقسم العمارة كلية الهندسة جامعة القاهرة

الزجاج ذو النفاذية الاختيارية للإشعاع الشمسى
مدخل للتصميم البيئى للفتحات الخارجية فى المبانى

ملخص البحث

الزجاج عنصر أساسى فى تصميم النافذة، وهو مجال واسع وسريع التطور، وشديد التأثير على القرارات البيئية والتصميمية للمعمارى، وهذا البحث محاولة لتجميع وتصنيف عدد كبير من التقنيات المستخدمة فى الزجاج، وربطها بالأساس النظرى الفيزيائى الذى بنيت عليه، لفتح طريق للمعماريين لفهم نوعياتها والتطورات الحديثة فيها، والمفاضلة بينها واختيار أنواع من الزجاج جيدة الأداء تحقق مواصفات كودات ترشيد استهلاك الطاقة بالمبانى.
فهناك أنواع من الزجاج تقلل مرور الإشعاع الشمسى بشكل عام، وأخرى متقدمة يمكنها تغيير النفاذية تبعا للاحتياج، وهى ثلاث فئات رئيسية، أولها الزجاج ذو النفاذية الانتقائية للطول الموجى، الذى ينفذ الضوء المرئى أكثر من الأشعة تحت الحمراء، وأفضل أنواعه الزجاج الأخضر. وتشمل الزجاج منخفض الانبعاثية، ويتميز بتقليل الحرارة المعاد بثها للفراغ نتيجة قلة انبعاثيته للأشعة تحت الحمراء.
وثانيها الزجاج متغير النفاذية، كالزجاج الكهربى الذى يتم فتحه أو غلقه بضغطة زر أو بالتحكم الالكترونى، وتتركز حوله الأبحاث الدولية، وإن كان ما زال قليل الانتشار بالأسواق.
وثالثها الزجاج ذو الانتقائية لزاوية السقوط الذى يحمل فرصة عالية للنجاح فى توفير الطاقة تماثل تلك التى لكاسرات الشمس مع التخلص من عيوبها.
كما يعرض البحث مؤشرات كمية لأداء الزجاج تساهم فى تقييم مطابقته للكودات، مثل النفاذية الشمسية الكليةSHGC أو النفاذية الضوئية T_{vis}.

تمهيد:

تمثل الفتحات الخارجية عنصرا رئيسيا فى تصميم المبانى، سواء من الناحية الوظيفية والبيئية أو فى تحديد الملامح المعمارية، فالنافذة نظام معقد متعدد المهام، عليه مسئولية الاتصال بين الداخل والخارج بشكل انتقائى، يسمح بمرور المؤثرات البيئية المرغوبة، ويعزل المؤثرات غير المرغوبة. بالاضافة لأدوارها الأخرى مثل السماح بالرؤية الخارجية مع حفظ الخصوصية. مع عدم اهمال التأثير التشكيلى للزجاج.

ونظرا لتعدد العناصر التى يجب منعها أو السماح بنفاذها، وتداخل النوعين أحيانا، أصبح تصميم النوافذ عملية معقدة ومتقدمة، دخلت بها عدة تخصصات مساعدة للمعمارى، مثل علماء فيزياء المواد والكيمياء، بل ومهندسى الإلكترونيات، تتعاون لتصميم نوافذ ذات كفاءة عالية وظيفيا

وجماليا وبيئيا، تحقق التوفير فى استهلاك الطاقة، بتكلفة اقتصادية مقبولة.

وقد زاد من أهمية الأمر صدور كودات ترشيد استهلاك الطاقة فى المبانى، فى مصر وعدد من الدول العربية، وهو ما يلزم المعمارى بالمفاضلة بين أنواع الزجاج لاختيار أنواع من الزجاج تلبى احتياج المواصفات التى يتطلبها الكود، ويفرض عليه بالتالى ضرورة الفهم الجيد لنوعيات الزجاج وكيفية أدائها لوظائفها.

المشكلة البحثية:

يرتبط عدد كبير من المتغيرات التى تتعامل معها النافذة بالإشعاع الكهرومغناطيسى، وقدرة الزجاج على تمييز نوعيات الإشعاع المرغوب لإنفاذه، وغير المرغوب لمنعه، سواء الإشعاع الشمسى، أو الضوء المرئى ودوره فى الرؤية للخارج أو الإضاءة الطبيعية، أو الأشعة تحت الحمراء وتأثيراتها الحرارية.
وعند تصميم الفتحات بهدف تحقيق النفاذية الاختيارية للإشعاع، يواجه المصمم صعوبات نتيجة غموض الحدود الفاصلة بين نوعيات الإشعاع، وغموض الهدف من التصميم والمعايير التى يحكم بها عليه، والتضارب أحيانا بين الأهداف المختلفة، كما أن التقنيات المتعددة سواء التقليدية أو المتقدمة، تتسم بصفات انتقائية غير واضحة لمعظم المصممين، فيصعب تصنيفها أو وضعها فى منظومة للتقنيات تسمح بالاختيار منها.

هدف البحث:

يهدف البحث لتصنيف وتحديد التقنيات الحديثة فى الزجاج ذو النفاذية الاختيارية للإشعاع الشمسى، وكيفية الاستفادة من هذه الخواص لتحقيق الأهداف المعمارية للنافذة، وتوضيح الخلفية العلمية التى يبنى عليها أساس عمل كل تقنية منها، ليمكن للمعمارى البيئى التعامل الواعى مع النوعيات المختلفة، سواء على المستوى التطبيقى أو البحثى.

كما يهدف البحث كذلك لتحديد اتجاهات البحث والتطوير العالمية فى هذا المجال، لتحديد المجالات البحثية المتقدمة التى لا تزال بحاجة لدراسة علمية جادة لحل المشاكل التصميمية والتقنيات التى يجب تطويرها لتحسين الأداء المعمارى للزجاج، والتى تحتاج لتدخل الباحثين من المعماريين البيئيين على وجه الخصوص فى عملية التطوير. لفتح الباب لمزيد من البحوث المفيدة فى مجال العمارة البيئية.

منهج البحث:

منهج تحليلى مقارن يعمد إلى الوصول إلى هدف البحث من خلال أربعة أجزاء رئيسية:

١- تحديد الأهداف المطلوبة والمعايير المطلوب تحقيقها فى تصميم النوافذ إشعاعيا.
٢- التوصيف العلمى لكيفية انتقال الحرارة عبر الزجاج
٣- عرض وتصنيف التقنيات المستخدمة فى النوافذ واتجاهات تطورها وتقييم تحقيقها للمعايير المستخدمة.
٤- المقارنة الكمية بين بعض نوعيات الزجاج وعلاقتها بكودات توفير الطاقة فى المبانى.

١- الأهداف المطلوبة والمعايير المطلوب تحقيقها فى تصميم النوافذ.

يعد التصميم البيئى للنوافذ عملية شديدة التعقيد نظرا لتعدد الأهداف، فالتصميم لتحقيق هدف يمكن أن يناقض هدفا آخر، لذا يجب تحديد الأهداف المطلوب تحقيقها بوضوح، ليمكن الحكم على أى الأهداف يتأثر ايجابا أو سلبا بكل قرار تصميمى.

فالنافذة مثلا عليها أن تعمل كمرشح أو فلتر لإنفاذ لضوء لتوفير الإضاءة الطبيعية، وحجب الإشعاع الشمسى المباشر لمنع تسخين الفراغات وزيادة الإبهار الضوئى، وعليها أن تعمل كصمام يسماح لمستخدمى الفراغ برؤية الخارج ومنع من بالخارج من رؤيتهم لحفظ الخصوصية، وكذلك عليها السماح لأشعة الشمس بالدخول شتاءا للتدفئة والتطهير، بينما عليها منعها من الدخول صيفا. أى أن على النافذة أن تكون قادرة على تغيير نفاذيتها بشكل اختيارى تبعا للوقت والظروف المناخية.

ويعد اختيار نوع الزجاج جزءا رئيسيا من عملية تصميم النافذة ، لذا يلخص هذا القسم الأهداف التصميمية التى يجب على النافذة تحقيقها، مع التركيز على تأثير الاشعاع عليها، وهو الجزء الأكثر أهمية فى دور الزجاج (جدول-١)، بالاضافة لبعض الوظائف غير المرتبطة بالاشعاع بشكل مباشر لكنها تؤثر على اختيار نوع الزجاج. (جدول-٢)

أولا : أهداف مرتبطة بالاشعاع

١- الأداء الحرارى للنافذة

أ- تقليل نفاذ الحرارة صيفا للداخل

يجب أن تقلل النافذة من مرور الحرارة من الخارج للداخل:

١) منع نفاذ الإشعاع الشمسى المباشر: بوسائل الإظلال المختلفة، أو بتحسين نوع الزجاج، مع ملاحظة التأثير المباشر لوجود الإشعاع الشمسى على الراحة الحرارية داخل الفراغات حتى قبل أن ترتفع درجة حرارة الهواء.

٢) تقليل إشعاع الزجاج وعناصر النافذة للحرارة فى صورة موجات طويلة نتيجة إرتفاع درجة حرارة الزجاج، سواءا بانتقال الحرارة إليه من الهواء الخارجى، أو بامتصاصه لجزء من الإشعاع الشمسى الذى يتعرض له.

٣) تقليل انتقال الحرارة بالتوصيل عبر الزجاج نتيجة لفارق درجة الحرارة بين الداخل والخارج وهو ما يتم مقاومته باستخدام الزجاج المزدوج الذى يحصر بين لوحيه فراغا هوائيا أو غازيا يمثل عازلا حراريا لانتقال الحرارة بالتوصيل، ولكن الحرارة تنتقل بين اللوحين بالحمل والإشعاع، مما يعطى أهمية من جديد الخواص الإشعاعية للزجاج.

ب- زيادة نفاذ الحرارة شتاءا للداخل:

وذلك بالسماح للإشعاع الشمسى المباشر بالنفاذ للداخل لفترة من اليوم، تكفى لرفع درجة الحرارة وتقليل أحمال التدفئة، وكذلك القضاء على الجراثيم داخل الفراغات.

جـ تقليل نفاذ الحرارة شتاءا للخارج:

وذلك بتقليل نفاذية الزجاج للأشعة تحت الحمراء التى تبثها الحوائط والأجسام الساخنة داخل الفراغ. وزيادة العزل الحرارى للزجاج

ب - الإضاءة الطبيعية

١- زيادة كمية الإضاءة الطبيعية:
عادة ما يكون ذلك بزيادة نفاذ الإشعاع الشمسى المشتت من القبة السماوية أو المنعكس من الأسطح المحيطة، وذلك بهدف تقليل الطاقة المستهلكة فى الإضاءة الصناعية وتقليل التشوه اللونى الذى تسببه، وتحقيق الحد الأدنى من الإضاءة عند انقطاع التيار الكهربى.

٢- حسن التوزيع:
عادة ما تكون المناطق القريبة من النوافذ أشد فى درجة إضاءتها عن باقى مناطق الفراغ، مما يعنى أن جزءا من الغرفة قد يكون جيد الإضاءة بينما تتسم أجزاء أخرى بنقصها، فيجبر المستخدمين على استخدام الإضاءة الصناعية، ويساهم ارتفاع النافذة وحسن تصميمها واستخدام معالجات مناسبة فى تحسين توزيع الإضاءة داخل الفراغ.

٣- منع الإبهار:
الإبهار هو وجود سطح أو جزء من الفراغ ذو شدة إضاءة أعلى بكثير من الباقى مما يرهق العين، وعادة ما تكون النافذة هى أكثر الأسطح استضاءة، ويمثل دخول الإشعاع الشمسى المباشر سببا للإبهار، حيث ترتفع شدة استضاءة الأسطح المعرضه له بقدر كبير.
فمن الممكن أن تكون مساحة صغيرة من النوافذ كافية لدخول كمية كافية من الإضاءة، ولكن تكون شدة استضاءتها عالية لدرجة تسبب الإبهار، مما يعنى ضرورة زيادة مساحة الفتحة وتقليل شدة إضاءتها نسبيا بحيث تحقق حسن التوزيع وتمنع الإبهار.

جـ الرؤية عبر الفتحات:

١- السماح بالرؤية للخارج:
يحتاج مستخدموا المبانى لرؤية الخارج لأسباب نفسية عديدة خاصة عند وجود منظر مميز، ومن الضرورى أن تسمح النوافذ بالرؤية للخارج بقدر يتناسب مع أهمية المنظر الخارجى.

٢- الحجب الجزئى للمنظر الخارجى:
أحيانا ما يكون المنظر الخارجى قيما أو جزء منه يشوه المنظر، لذا يكون من المفيد حجب الأجزاء غير المرغوبة من المنظر الخارجى.

٣- الحماية من التطفل وحماية الخصوصية:
فى معظم الفراغات الإنتفاعية (خاصة السكنية) يكون من المهم حماية شاغلى الفراغ من رؤية غيرهم لهم من خارج الفراغ، لذا يجب أن تكون الفتحة قادرة على منع الرؤية عن الخارج للداخل، سواء المنع الكلى أو على الأقل منع تمييز المنظر الداخلى بدقة تجرح الخصوصية.

٤- السماح بالرؤية من الخارج:
مثل حالة المحلات التجارية التى تحتاج لرؤية المعروضات من الخارج، فعند تصميم واجهة محل يجب حمايته من الإشعاع الشمسى غير المرغوب وفى نفس الوقت السماح للعملاء بمشاهدة نوافذ العرض بشكل جيد.

جدول-١ الوظائف الاشعاعية للنافذة

	الهدف الرئيسى	الأهداف الفرعية	فائدتها
الأداء الحرارى	**تقليل نفاذ الحرارة صيفا للداخل**	منع نفاذ الإشعاع الشمسى المباشر	تقليل درجة الحرارة الإشعاعية تقليل أحمال التبريد تقليل الإبهار الضوئى
		تقليل إشعاع الزجاج وعناصر النافذة للحرارة فى صورة موجات طويلة	تقليل درجة الحرارة الإشعاعية تقليل أحمال التبريد
		تقليل نقل الحرارة بالتوصيل عبر الزجاج	تقليل أحمال التبريد
	زيادة نفاذ الحرارة شتاءا للداخل:	السماح للإشعاع الشمسى المباشر بالنفاذ للداخل لفترة من اليوم	رفع درجة الحرارة الاشعاعية تقليل أحمال التدفئة القضاء على الجراثيم بالفراغات
	تقليل نفاذ الحرارة شتاءا للخارج:	تقليل إشعاع الزجاج وعناصر النافذة للحرارة كموجات طويلة للخارج	تقليل أحمال التدفئة
		تقليل انتقال الحرارة بالتوصيل	تقليل أحمال التدفئة
الإضاءة الطبيعية	زيادة كمية الإضاءة الطبيعية	زيادة نفاذ الاشعاع الشمسى المشتت والمنعكس	توفير طاقة الإضاءة الصناعية تحسين الضوء واظهار الألوان
	حسن التوزيع:	تقليل النسبة بين أقل وأعلى شدة استضاءة فى أسطح الفراغ زيادة عمق نفاذ الإضاءة الطبيعية تقليل شدة استضاءة سطح النافذة منع دخول الإشعاع الشمسى المباشر	تحسين القدرة على الرؤية وراحة العين تقليل الاحتياج لدعم بالإضاءة الصناعية
	منع الإبهار	منع دخول الإشعاع الشمسى المباشر	تحسين القدرة على الرؤية وراحة العين تقليل احتمال اغلاق الستائر لتفادى الإبهار والغاء الاضاءة الطبيعية
الرؤية عبر الفتحات:	الرؤية للخارج	السماح برؤية المنظر الخارجى	الأهمية النفسية للاتصال بالخارج الاستفادة بقيمة المناظر المتميزة
		الحجب الجزئى للمنظر الخارجى	تفادى مظاهر التلوث المرئى تفادى تشتيت انتباه مستخدمى الفراغ
	الرؤية من الخارج للداخل	منع الرؤية من الخارج للداخل	الحماية من التطفل وحماية الخصوصية
		السماح بالرؤية من الخارج	الترويج للسلع والأنشطة التجارية

ثانيا : الأهداف غير المرتبطة بالاشعاع:

وهذه الأهداف يجب أن تحققها النوافذ رغم انها ليست داخلة فى موضوع البحث، ولكن يجب مراعاة أن المعالجات الإشعاعية المستخدمة لا تمنع تحقيق هذه الأهداف.
ويلخص جدول-٢ هذه الأهداف

جدول-٢ وظائف النافذة غير المرتبطة بالاشعاع

التأثير على التشكيل المعمارى:	١- التوافق مع التشكيل الشكل وعدم التأثير سلبا على القيمة الجمالية للمبنى ٢- التعبير السليم عن الفلسفة المعمارية للمصمم دون فرض تعبير معين عليه
التكاليف واقتصاديات التشغيل:	رخص التكلفة الابتدائية قلة مصروفات الصيانة والاستبدال والتشغيل امتداد العمر الافتراضى لمكونات النافذة
سهولة التصنيع	سهولة تصنيع عناصر النافذة وعدم احتياجها إلى عمالة أو اجراءات معقدة سهولة التركيب بالموقع
سهولة التشغيل والصيانة	تقليل الإحتياج إلى مشغل متفرغ أو متخصص، أو أن تستهلك من وقت وتركيز المستخدمين الكثير من الوقت تقليل احتياجها إلى معدات معقدة يصعب صيانتها (خاصة فى ظروف التشغيل المحلية) استمرارها فى أداء الحد الأدنى من وظائفها فى ظروف الطوارئ
الأداء الصوتى	يفضل أن تكون الفتحة قادرة على منع الضوضاء من النفاذ إلى داخل الفراغ. الحفاظ على خصوصية الشاغلين بمنع الأصوات الداخلية من الخروج.
حركة الهواء	السماح بالتهوية الطبيعية وحركة الهواء بشكل ايجابى عندما تكون درجات حرارة الهواء الخارجى ملائمة منع تسرب الهواء عندما تكون درجة حرارة الهواء الخارجى غير ملائمة.
الحركة البشرية والأمن	تسمح الأبواب بالدخول والخروج للأشخاص المرغوبين يجب أن تكون الفتحات الخارجية صعبة الكسر والإقتحام لتمنع اللصوص والمتطفلين من الدخول أو الخروج لا تسبب جروحا أو إصابات عند إنكسارها عفويا. الثبات بحيث لا تسقط للخارج وتسبب مخاطر للملرة أسفلها
الأهداف البيئية	تحقيق ظروف بيئية داخلية آمنة وصحية وملائمة ومريحة تقليل التأثير البيئى السلبى على البيئة الخارجية تقليل استهلاك الطاقة

٢- المبادئ العلمية لانتقال الإشعاع عبر الزجاج

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

الإشعاع الشمسى والحرارى

يمثل الإشعاع الشمسى جزءا من الإشعاع الكهرومغناطيسى، الذى يشمل أنواعا عديدة من الإشعاع تختلف باختلاف الطول الموجى لها، يشمل الضوء المرئى (٤٧%) والأشعة فوق البنفسجية (٣%) والأشعة تحت الحمراء (٥٠%).

فالضوء المرئى هو جزء من طيف الاشعاع الشمسى، يتراوح طوله الموجى بين ٠,٤ ميكرون للون البنفسجى، و٠,٧ ميكرون للون الأحمر، ويتغير الطول الموجى للألوان المعروفة بين هاتين القيمتين، ويختلف الضوء المرئى عن باقى أنواع الأشعة بحساسية العين البشرية له والتى تبلغ حساسيتها القصوى بالنسبة للضوء الأصفر الذى يقع تقريبا قى منتصف الطيف المرئى. (شكل -١)

أما الأشعة التى يزيد طولها عن ٠,٧ ميكرون فتسمى بالأشعة تحت الحمراء، وهى من نوعين ،القريبة من الضوء المرئى (طولها الموجى من ٠,٧ إلى ٤,٥ ميكرون) والبعيدة (٤,٥ إلى ١٠٠٠ ميكرون)، وتصدر الأشعة تحت الحمراء من أى جسم تزيد حرارته على الصفر المطلق، ويقل الطول الموجى للأشعة كلما زادت درجة حرارة السطح المصدر لها، فالطول الموجى للأشعة تحت الحمراء يتحدد بدرجة حرارة السطح الذى يرسلها، فالأجسام التى تقل درجة حرارتها عن ١٢٠٠ م تصدر اشعاعا ذو طول موجى كبير نسبيا هو الإشعاع الحرارى أو الأشعة تحت الحمراء البعيدة، أما الأجسام الساخنة مثل الشمس (٦٠٠٠م) فتصدر إشعاعها فى نطاقات الأشعة تحت الحمراء القريبة والضوء المرئى والأشعة فوق البنفسجية (٠,٣ – ٢,٥ ميكرون)، ومعظم الأجسام على الأرض وداخل المبانى أبرد بكثير من ١٢٠٠ م، فالإشعاع الذى يصدر عنها يكون إشعاعا حراريا، ويختلف نوعى الأشعة تحت الحمراء فى عدة عوامل هامة معماريا، الأول أن الإشعاع الشمسى يضم الأشعة تحت الحمراء القريبة فقط (حتى ٢,٥ ميكرون) بنسبة كبيرة تعادل نصف طاقته تقريبا، بينما يخلو من الأشعة تحت الحمراء البعيدة، والفارق الثانى أن الزجاج المعتاد فى التطبيقات المعمارية عديم النفاذية للأشعة تحت الحمراء البعيدة التى تصدر من داخل الفراغات المعمارية، فهو بالنسبة لها معتم تماما، بينما ينفذ الزجاج الأشعة تحت الحمراء القريبة بدرجات مختلفة تتوقف على نوعه، مثلما ينفذ الضوء المرئى. (شكل-٢)

ومن الجدير بالذكر أن معظم مقررات العمارة البيئية تنص على أن **"الزجاج ينفذ الضوء المرئى بينما يمنع الأشعة تحت الحمراء، مما يسبب ظاهرة الصوبة الزجاجية"**، وهى معلومة صحيحة جزئيا، حيث أن الزجاج يمنع الأشعة تحت الحمراء البعيدة، أما الأشعة تحت الحمراء القريبة من الضوء المرئى فهى تنفذ من الزجاج العادى، ويتم الجهد البحثى لتطوير أنواع الزجاج الجديدة لتقلل من نفاذ هذا النوع من الأشعة تحت الحمراء.

فعند التعامل مع الاشعاع الشمسى فى الفترات الحارة، يكون المطلوب نفاذ الضوء المرئى بكمية كافية لتقليل استهلاك الطاقة فى الإضاءة، وفى نفس الوقت تقليل دخول الأشعة تحت الحمراء التى تمثل نسبة كبيرة من الاشعاع الشمسى، التى ترفع من درجة حرارة الفراغ وتزيد أحمال التكييف دون فائدة ضوئية. وهذه الأشعة رغم أن العين لا تشعر بها، إلا أن الجلد يشعر بها، وتسبب الشعور بارتفاع درجة الحرارة بشكل مباشر حتى لو لم ترتفع درجة حرارة الهواء.

ويعانى بعض الطلاب والمعماريون من صعوبة تصور كيف يكون الزجاج معتما لإشعاع ومنفذا لآخر، إلا أن الأجسام بشكل عام تختلف نفاذيتها للطول الموجى للإشعاع، فالجسم البشرى مثلا معتم للضوء المرئى، لكنه شفاف بالنسبة لأشعة X (طولها الموجى أقصر من الأشعة فوق البنفسجية)

باستثناء العظام ، التى تظهر معتمة، وهو ما يستخدم فى التطبيقات الطبية للتصوير بالأشعة.

وتبنى فكرة عمل الزجاج المنتقى للطول الموجى على هذه الخاصية، فالزجاج الشفاف الأبيض هو زجاج منفذ لكل الأوان بالتساوى، أما الزجاج الأحمر فينفذ الضوء الأحمر فقط ويمتص باقى الألوان، وهكذا يكون معتما للضوء الأخضر أو الأزرق، فتظهر الأجسام غير الحمراء من خلال هذا الزجاج سوداء، وهذا الزجاج يعتبر ذو نفاذية انتقائية للطول الموجى، وأنواع الاشعاع بشكل عام هى (ألوان) مثل تلك المعروفة فى الضوء المرئى التى تختلف فى طولها الموجى، وإن كانت بعض الألوان غير مرئية، مثل (اللون) فوق البنفسجى أو (اللون) تحت الأحمر، فالزجاج يمكن أن ينفذ كل الألوان (المرئية وغير المرئية) بالتساوى فيكون أبيض أو رماديا، أو يقلل من نفاذية بعض الألوان المرئية مثل اللون الأحمر فيميل لون الزجاج للزرقة. أو يقلل من نفاذية بعض الألوان غير المرئية مثل اللون تحت الأحمر، فيكون زجاجا (باردا) ينفذ الضوء المرئى دون الحرارة المصاحبة له. (شكل-٣)

مرور الإشعاع من الزجاج

يتعرض الاشعاع الشمسى عند مروره فى الزجاج لمجموعة من العمليات تحدد كيفية نفاذ الأشعة منه، وهى على الترتيب: الانعكاس الخارجى، الامتصاص والتشتيت، الانعكاس الداخلى، النفاذ إلى الفراغ، إعادة بث الإشعاع الحرارى (شكل-٤)

الانعكاس الخارجى

عند سقوط الشعاع الشمسى على سطح لوح الزجاج ينعكس جزء منه بينما ينفذ الباقى إلى داخل الزجاج، فينعكس جزء منه من السطح الداخلى للزجاج، وتتوقف النسبة المنعكسة على معامل انكسار الزجاج وزاوية السقوط، حيث تزيد النسبة المنعكسة بزيادة كل منهما.
وبالنسبة للزجاج العادى (معامل انكساره ١,٥) ينعكس ٤% من الإشعاع الساقط عموديا على سطحه الخارجى، ومثلها تقريبا من السطح الداخلى، ولا يتوقف ذلك على سمك الزجاج ولا لون مادته.
ويمكن زيادة هذه النسبة بطلاء السطح الخارجى بطبقة رقيقة من المعدن العاكس (سمكها ٣-٢٠ ميكرون) لتصل إلى ٢٠ %، كما يمكن اختيار مواد الطلاء لتكون أكثر انعكاسا للأشعة تحت الحمراء من انعكاسيتها للضوء المرئى، كما يمكن انقاص الانعكاسية بطلاءات خاصة تقلل من لمعان السطح، وان كانت عملية تقليل الانعكاس غير مفيدة حراريا ولكنها تستخدم لتحسين الرؤية غبر الزجاج فى بعض التطبيقات المعمارية مثل فترينات العرض، بينما تستخدم بكثافة فى الشاشات والنظارات وعدسات التصوير.

الامتصاص والتشتيت

أما الإشعاع الذى ينفذ من السطح الأول فيمتص ويتشتت جزء منه داخل الزجاج تتحدد قيمته بسمك الزجاج ونقائه ونوع مادته، وبالنسبة للزجاج العادى سمك ٣ مم يمتص ٦- ٩ % من الأشعة الساقطة فى جسم الزجاج، وتزيد النسبة الممتصة إلى الضعف تقريبا بزيادة سمك الزجاج، وتتحول هذه النسبة إلى حرارة تسخن الزجاج ثم يعاد نقلها من الزجاج بالتوصيل وبالإشعاع فى صورة أشعة حرارية (تحت حمراء بعيدة).
وعادة ما يكون الزجاج الملون أو الداكن ماصا للإشعاع الشمسى بنسبة تزيد عن الزجاج العادى

ويمكن التحكم فى نسبة الامتصاص بزيادة نسبة الشوائب فى الزجاج واختيار مادة الشوائب لتحدد الألوان والأطوال الموجية التى يتم امتصاصها، بحيث يكون امتصاصه انتقائيا. ويفضل بالطبع زيادة امتصاص الزجاج للأشعة تحت الحمراء وفوق البنفسجية، وتقليل امتصاص الضوء المرئى.

الانعكاس الداخلى والانكسار

يصل الشعاع الذى لم يمتص إلى السطح الداخلى للزجاج فينفذ جزء منه إلى الفراغ الداخلى، وينعكس جزء آخر مرة أخرى ليدخل فى سلسلة من الانعكاسات الداخلية.

و ينكسر الشعاع الذى يمر من السطح الخارجى بسبب فارق الكثافة الضوئية بين الهواء والزجاج، فيمر داخل الزجاج بزاوية تختلف عن زاوية سقوطه، ولكن عند خروجه من السطح الآخر للزجاج ينكسر مرة أخرى فيستعيد اتجاهه الأصلى إذا كان السطحين متوازيين (وهو الوضع المعتاد) بينما يمكن إذا نغيرت زوايا السطح الداخلية (مثل حالة الزجاج الزخرفى) أن ينعكس الشعاع انعكاسا داخليا كليا بحيث يعود للخارج، وهى خاصية تستخدم فى تصميم الزجاج ذو النفاذية الانتقائية مع الاتجاه.

إعادة بث الإشعاع الحرارى

تتحول النسبة الممتصة من الإشعاع إلى حرارة تسخن الزجاج ثم يعاد نقلها من الزجاج بالتوصيل وبالإشعاع فى صورة أشعة حرارية (تحت حمراء بعيدة). فيتجه جزء من هذا الشعاع للخارج وجزء للداخل، وتتوقف النسبة المتجهة للداخل والخارج على عدة عوامل أهمها الخواص الإشعاعية لسطحى الزجاج، ولكن يمكن بتبسيط مقبول فى معظم الأحوال اعتبار أن نصف الإشعاع الحرارى يتجه للداخل بينما يتجه نصفه للخارج. والزجاج منخفض الانبعاثية يعمل على التعامل مع هذه المشكلة بتقليل انبعاثية السطح الداخلى للأشعة الحرارية مما يجعل نسبة أقل من الحرارة الممتصة تتجه للداخل.

النفاذ إلى الفراغ

تنفذ نسبة من الإشعاع الذى نجا من الانعكاس والامتصاص إلى داخل الفراغ، وبالنسبة للزجاج الأبيض العادى يكون نصف هذا الشعاع تقريبا من الضوء المرئى (٤٧%) ونصفه من الأشعة تحت الحمراء وفوق البنفسجية (٥٣%)، أما أنواع الزجاج الأخرى فقد تغير هذه النسبة تبعا لخواص الزجاج، وكلما كانت نسبة النافذ من الضوء المرئى إلى النافذ من الأشعة الأخرى أكبر، كلما كان أداء الزجاج أفضل، ويعبر عن هذه النسبة بمؤشر يسمى **معامل البرودة**. ويضاف إلى نسبة الأشعة تحت الحمراء المارة النسبة المعاد بثها من الإشعاع الحرارى السابق امتصاصه.

٣- التقنيات المستخدمة فى الزجاج ذو النفاذية الاختيارية وتقييم تحقيقها للأهداف التصميمية.

هناك عدة أنواع من الزجاج قادرة على تقليل كمية الحرارة المارة إلى داخل الفراغ من الإشعاع الشمسى بشكل عام، ويعتمد ذلك على زيادة إمتصاص أو عكس الزجاج للإشعاع، كما توجد نوعيات من الزجاج أكثر تقدما يمكنها الانتقاء بين زيادة النفاذية أو اقلالها تبعا للظروف، وتقع هذه النوعيات فى ثلاث فئات رئيسية تضم كل منها عدة أنواع، كما هو موضح بجدول-٣، وتعرض السطور القادمة بعض نوعيات الزجاج غير الانتقائية التى تقلل الشعاع الشمسى بشكل عام، بهدف التمييز بينها وبين النوعيات المستخدمة ذات النفاذية الاختيارية

أ- الزجاج المقلل لنفاذ الإشعاع بشكل غير انتقائى

الزجاج الماص للحرارة:

وهو زجاج يتم خلطه بشوائب ملونة قادرة على امتصاص الإشعاع الشمسى، ويتم ذلك عبر كامل سمك الزجاج، مما يعطى الضوء المار لونا مختلفا يتوقف على نوع المادة الماصة.
فالزجاج المدخن بنى اللون (المعروف بالزجاج الفيميه) ينتمى لهذه الفئة، كما ينتمى إليها زجاج ذو ألوان أخرى مثل الرمادى الذى يتميز بعدم تشويهه لألوان المنظر الخارجى، ويمتص الزجاج الماص نسبة تقترب من نصف الإشعاع الشمسى الساقط عليه، مما يؤدى لرفع درجة حرارته، وبالتالى قيامه بإشعاع هذه الطاقة الممتصة فى صورة أشعة تحت حمراء، نسبة منها إلى داخل الفراغ والباقى خارجه مما يرفع من الإكتساب الحرارى الشمسى الكلى لحوالى ٧٠ % رغم أن نفاذية الضوء المرئى تكون فى حدود ٥٠ % فقط.
وهناك بعض أنواع الزجاج الماص لها نفاذية انتقائية للضوء مثل الزجاج الأخضر والأزرق اللذان يتميزان بزيادة نسبة امتصاص الأشعة تحت الحمراء مقارنة بالضوء المرئى. سيتم التعرض لهما لاحقا.

الزجاج العاكس: (الزجاج المطلى بطبقة عاكسة):

يعتمد الزجاج العاكس فى منعه لنفاذ الإشعاع الشمسى على وجود طبقة رقيقة شفافة، يتم طلائها على سطح الزجاج العادى أو الماص للحرارة، ويفضل أن تكون الطبقة المعدنية خارجيه مواجهة للشمس، بحيث تمنع دخول الإشعاع الشمسى للزجاج، ولكن ذلك يحتاج أن تتحمل هذه الطبقة الرقيقة العوامل الجوية لذا لابد أن تتم عملية الطلاء أثناء تصنيع الزجاج بينما لا يزال منصهرا، أما إذا تم الطلاء فى مرحلة لاحقة، فإن الطبقة المعدنية تكون غير قادرة على تحمل العوامل الجوية ويتم استخدامها من الداخل فقط. وتقلل الطبقة العاكسة نفاذية الزجاج بشكل عام وخاصة اذا استخدمت طبقة الطلاء على زجاج ماص داكن(الزجاج العاكس الماص)، وكن هناك بعض الطلاءات (مثل الذهب لها خواص انتقائية سيتم التعرض لها لاحقا)

الزجاج المطبوع بالسيراميك Ceramic Frits:

يتم طباعة سطح الزجاج بشبكة رقيقة من مادة سيراميكية غير شفافة، تقلل من سطح الزجاج الشفاف، وتقلل من كمية الإشعاع المارة من الزجاج بزيادة كمية الضوء المنعكس والممتص من مادة الشبكة المطبوعة ويمكن زيادة قوة الشبكة بطباعتها قبل عملية التقوية النهائية للزجاج بحيث يتشرب الزجاج هذه المادة أثناء تسخينه لحوالى ٧٠٠°م.
وليس لهذه الطبقة خواص انتقائية بشكل عام، ولكن يمكن أن تكون ذات نفاذية انتقائية للاتجاه فى حدود ضيقة إذا زاد سمك الطبقة السيراميكية بشكل كبير.
ويمكن زيادة كفاءة الزجاج الذى تستخدم فيه هذه الشبكة بإضافة طلاء معدنى عاكس او استخدام زجاج ماص للحرارة.

الزجاج متعدد الطبقات Laminated Glass:

إن أكثر أنواع الزجاج متعدد الطبقات انتشارا هو زجاج السيارات ثلاثى الطبقات (التريبلكس) وهو عبارة عن لوحين من الزجاج بينهما غشاء من البلاستيك الشفاف يلصق الطبقتين.

وإن كان الهدف من وجود الغشاء البلاستيكى المرن فى زجاج السيارات هو تقوية الزجاج ضد الكسر، وتثبيت قطع الزجاج المكسور فى حالة الحوادث لتقليل الخسائر والإصابات الناتجة عنه، فإنه من الممكن استخدام هذا الغشاء لأغراض أخرى مثل تقليل الإشعاع الشمسى النافذ إذا كان الغشاء من مادة ماصة للحرارة أو كان مطليا بمادة معدنية عاكسة .

الأغشية المانعة لنفاذ الأشعة Solar Protection sheets:

وقد ظهرت عدة أنواع من الأغشية الرقيقة ذات الخواص الضوئية التى تحسن الأداء الحرارى للزجاج، سواءا بلصقها على سطحه (الداخلى عادة) أو بوضعها فى وسط الزجاج متعدد الطبقات بين لوحين من الزجاج.

ويتكون الغشاء عادة من عدة طبقات متتابعة، أهمها مادة الأساس البلاستيكية، التى يتم إضافة طلاء عاكس إليها أو مادة ماصة للضوء، أو الاثنين معا، وفى حالة استخدام الغشاء كملصق على سطح الزجاج تضاف مادة لاصقة شفافة وطبقة مقاومة للخدش، وتتمثل الفائدة الرئيسية للأغشية فى إمكانية إضافتها إلى أى لوح من الزجاج لتحسين خواصه، مما يعنى إمكانية استخدامه لتحسين خواص الفتحات فى المبانى القائمة دون الحاجه لإستبدال الزجاج.

وهذه الشرائح تعطى للزجاج مظهرا داكنا أو معدنيا عاكسا تبعا لنوعها وينتشر استخدامها فى مصر فى زجاج السيارات وبشكل أقل فى نوافذ المساكن، كما تستخدم أحيانا أغشية بلاستيكية عاكسة لحماية النوافذ بشكل شعبى، وذلك باستخدام البلاستيك الخاص بتغليف الحلويات والمواد الغذائية التى تكون مطلية بطبقة معدنية نصف معتمة.

وعادة ما تكون الأغشية المنتشرة تجاريا مقللة للنفاذية للأشعة بشكل عام بدون انتقائية، لكن يمكن أن تكون ذات خواص انتقائية نتقدمة إذا صنعت بحيث تكون تصغيرا فى السمك لأحد أنواع الزجاج عالى الانتقائية.

ب- الزجاج ذو النفاذية الاختيارية للإشعاع

هناك عدة نوعيات من الزجاج يمكنها الانتقاء بين زيادة النفاذية أو اقلالها تبعا للظروف، وتقع هذه النوعيات فى ثلاث فئات رئيسية تضم كل منها عدة أنواع يلخصها جدول-٣:

جدول-٣ التقنيات المستخدمة فى الزجاج ذو النفاذية الاختيارية

أ- الزجاج ذو الانتقائية للطول الموجى Spectrum Selective	ب- الزجاج متغير النفاذية Switchable Glass	جـ الزجاج ذو الانتقائية الزاوية السقوط Angle Selective
١-الزجاج الماص • الزجاج المدخن (البنى) • الزجاج الأخضر • الزجاج الأزرق **٢- الزجاج العاكس** • المطلى بالذهب • المطلى بمواد أخرى • العاكس الماص **٣- الزجاج منخفض الانبعاثية** • الطبقة المخفضة من الداخل • الطبقة المخفضة من الخارج	**١- الزجاج متغير النفاذية ضوئيا** Photo-Chromic **٢-الزجاج متغير النفاذية حراريا** Thermo-Chromic **٣- الزجاج متغير النفاذية كهربيا (الزجاج الذكى) Electro-Chromic** • البللورات السائلة • الحبيبات المعلقة • الهيدريد العاكس • الزجاج متغير اللون بحقن الأيونات	**الزجاج المتجه غير المتجانس ضوئيا anisotropic** • الشوائب المتراصة مغناطيسيا • التبخير المائل • الحفر الضوئى لطبقة عاكسة **الزجاج المعتمد على الانعكاس** • الزجاج المنشورى • الزجاج المقطع بالليزر • الزجاج المجمع **كاسرات الشمس المدمجة** • التقطيع المتتابع • الشرائح المخدوشة طوليا

أ- الزجاج ذو النفاذية الإختيارية للطول الموجى:

من المعروف أن نصف الإشعاع الشمسى تقريبا من الضوء المرئى، بينما نصفه الأخر من الأشعة تحت الحمراء ذات الطول الموجى الكبير أو الأشعة فوق البنفسجية قصيرة الطول الموجى، ويمكن للزجاج إذا مرر الضوء المرئى فقط أن يقلل من نصف الحرارة التى تدخل للفراغ، عن طريق الأنواع الأخرى من الأشعة، أما الطاقة الحرارية التى يحملها الضوء المرئى فلا يتم منعها. فيتسم هذا الزجاج بأنه شفاف تقريبا ولا يعوق الرؤية أو نفاذ الإضاءة الطبيعية، بينما يكون أكثر إعتاما للأشعة غير المرئية، وهو ما يخفض الإكتساب الحرارى الشمسى إلى النصف تقريبا.
ويعتمد هذا الزجاج على طريقة من ثلاثة لتحقيق هذه النفاذية الإختيارية:

١ - الزجاج الماص للأشعة تحت الحمراء:
وفيه يكون الزجاج نفسه مخلوطا بمادة ماصة للأشعة تحت الحمراء بشكل أكبر من امتصاصها للضوء المرئى، مما يقلل نفاذه هذه الأشعة، والزجاج الملون الأخضر والأزرق المعروف يتسم بهذه الخاصية لحد ما، لذا يكون استخدامه أكفأ من الزجاج الملون البنى أو الرمادى، ولكن بشكل عام يكون الإعتماد على الإنعكاس أفضل من الإعتماد على الإمتصاص، لأن الطاقة الممتصة يعاد إشعاعها للداخل فى صورة أشعة تحت حمراء طويلة الموجات.

٢- الزجاج العاكس للأشعة تحت الحمراء:
وفيه يتم طلاء الزجاج بطبقة رقيقة من مادة عاكسة للأشعة تحت الحمراء بشكل أكبر من عكسها للضوء المرئى. والزجاج المطلى بالذهب يحقق هذه الخاصية، إذ يعكس الذهب الأشعة تحت الحمراء والضوء الأحمر والأصفر بدرجة تزيد على باقى الطيف المرئى، مما يجعل الزجاج من

الخارج يأخذ اللون المعروف للذهب، بينما تمر الأشعة منه بلون أقرب إلى الأزرق (نتيجة تقليل المكون الأحمر والأصفر من الطيف المرئى) وتقل بعا الأشعة تحت الحمراء نتيجة انعكاسها، ومن المفهوم أن التكلفة الاقتصادية للذهب هى العائق الرئيسى أمام انتشار مثل هذا النوع.

٣ الزجاج قليل الإنبعاثية للأشعة تحت الحمراء:

ولتقليل إنبعاث الحرارة التى امتصها الزجاج فى صورة أشعة تحت حمراء، يمكن طلاء الوجه الداخلى للزجاج بمادة ذات انبعاثية قليلة للضوء فى نطاق الأشعة تحت الحمراء، مما يقلل من نفاذها لداخل الفراغ.

فالحرارة التى يمتصها الزجاج يظل محتفظا بها وترفع درجة حرارته، مما يؤدى إلى إشعاع الحرارة للخارج والداخل، وفى العادة تكون الكمية التى تشع للخارج مساوية تقريبا للتى تشع للداخل، أى أن نصف الأشعة التى تم امتصاصها يعاد بثها لداخل الفراغ.

أما فى حالة استخدام طلاء قليل الإنبعاثية على السطح الداخلى، فإن نسبة الأشعة التى تبث للداخل تكون أقل مما يبث للخارج، مما يقلل من نفاذ الحرارة للداخل.

وكما يمكن استخدام الزجاج لحماية الفتحات من تسرب الحرارة للداخل فى المناطق الحارة بطلاء السطح الداخلى للزجاج، يمكن حماية الفتحة من التسرب الحرارى للخارج فى المناطق الباردة بطلاء السطح الخارجى للزجاج بحيث يمنع انبعاث الحرارة التى يمتصها الزجاج من الفراغ الداخلى سواءا بالحمل أو بالإشعاع. وتوجد بعض الفكار لاستخدام هذا الزجاج فى اطار يمكن عكس اتجاهه عند تغير الفصول ليكون اتجاه اللوح ملائما للظروف.

ويمكن استعمال هذا الزجاج فى النوافذ ذات الزجاج المزدوج بطلاء أحد الأسطح المقابلة للفراغ بين اللوحين لتوفير الحماية لطبقة الطلاء لحامية من نفاذ الإشعاع الحرارى.

ويوضح (شكل- ٥) مقارنة بين الأداء الحرارى والضوئى لعدة نوعيات من الزجاج ذو النفاذية الانتقائية للطول الموجى.

ب- الزجاج متغير النفاذية

تعتمد بعض أنواع الزجاج فى اكتساب قدرتها الإختيارية على تغير لونها وشفافيتها، ويتم ذلك إما تلقائيا بتغير الظروف المحيطة بها مثل تغير شدة الإضاءة أو درجة الحرارة، أو يتم بتأثير التحكم الكهربى الإختيارى فى لونها وشفافيتها، وهو ما يسمى بالزجاج الذكى، ومن الطبيعى أن النوع الأخير الذى يمكن التحكم فيه هو الأهم، ولكن لا يمنع هذا التعرض للنوعين الأخرين.

١- الزجاج متغير الشفافية تبعا لشدة الضوء: Photo-Chromic

وهو الزجاج المعتاد فى النظارات الشمسية متغيرة اللون، والتى يتحول لونها للبنى Photo-Brown أو الرمادى Photo-Grey عند تعرض النظارة لأشعة الشمس المباشرة، فتحمى عينى المستخدم من تأثيرها السلبى، بينما تكون شفافة فى غياب الضوء الشديد وتسمح بالرؤية.

ويتحقق ذلك بإضافة مواد كيميائية حساسة للضوء للزجاج، تتسم بأن لونها يتغير عند التعرض للضوء، وبأن هذا التغير ينعكس عند اختفاء تأثير الضوء ويمكن استخدام هذا النوع من الزجاج لتقليل نفاذ أشعة الشمس القوية والسماح بمرور أشعة الشمس الضعيفة.

ولكن لا يكون هذا الإختيار هو المطلوب فى معظم الأحيان، فقد يكون المطلوب نفاذ ضوء الشمس القوى خلال فترة بارده يحتاج الفراغ خلالها للتدفئة، كما أن الفترات التى يكون ضوء الشمس فيها ضعيفا هى فقط فترات الجو الغائم، أما عند التعرض لأشعة الشمس صيفا أو شتاءا فإن الزجاج

يتحول للون الداكن ويقلل من نفاذ الضوء.

٢- الزجاج متغير الشفافية تبعا لدرجة الحرارة:
وهو نوع من البللورات السائلة يتغير ترتيبها ونفاذيتها للضوء مع زيادة درجة الحرارة التى تتعرض لها، مما يعنى أن النافذة ستكون شفافة فى الجو البارد، ومعتمة فى الجو الحار، ولكن تبدو هذه القدرة على الإختيار صعبة التوظيف خاصة مع استخدام التدفئة والتبريد الميكانيكى، مع وجود أهمية كبيرة لجوانب أخرى فى الإنتقاء، لذا لم ينتشر هذا النوع كثيرا أو يثير انتباه أبحاث التطوير.

٣- الزجاج متغير اللون كهربيا (الزجاج الذكى):
وهى عائلة تضم عدة أنواع منها البللورات السائلة والجزيئات العالقة والهيدريد العاكس، والثلاثة السابقة قليلة الإنتشار، أما التقنية الاحدث والتى تبشر بنتائج عملية فى المستقبل فهى التى تعتمد على حقن الأيونات وفيها يلى عرض مبسط لهذه التقنيات:

ا- البلورات السائلة:
وهى تقنيه شائعة فى شاشات الأجهزة الإلكترونية كالآلات الحاسبة وشاشات الحاسبات المحمولة، وهى تعتمد على خواص سائل مكون من جزيئات البوليمرات الملونة (البلاستيك) تيتسم بأنها طولية (أشبه بعصى طويلة) وتتخذ ترتيبا شبه ثابت، حيث أنها لا تستطيع الحركة بحرية مثل جزيئات السوائل العادية نظرا لإصطدام الجزيئات ببعضها عند محاولة دورانها، وعندما تتوزع هذه الجزيئات عشوائيا أو فى اتجاه موازى لسطح الزجاج تكون معتمة للضوء، أما إذا تراصت فى اتجاه عمودى على سطح الزجاج فإن الضوء ينفذ من بينها ليصبح الزجاج شفافا تقريبا.

شكل-٧ الزجاج **الكهربى ذو البللورات السائلة،** عند غلقه أو فتحه كهربيا.

ويمكن التحكم فى اتجاه هذه البلورات عن طريق التيار الكهربى مثلما هو معتاد فى شاشات الإجهزة الإلكترونية، ويمكن باستخدام ألواح زجاج تضم فى داخلها طبقة البلورات السائلة توفير نوافذ يمكن فتحها أو غلقها بالنسبة للإشعاع بضغطة زر.
وقد وقفت التكلفة العالية عقبة أمام انتشار هذا النوع، حيث لم يصل لمرحلة التسويق سوى نوع واحد منها ذو بلورات بيضاء، تجعل الزجاج الشفاف يتحول للون الأبيض غير منفذ للضوء المباشر، ولكن يمرر الضوء مشتتا، (أى أن الزجاج عند إعتامه يصبح أشبه بسحابة بيضاء، تمنع الرؤية، ولم تلاق هذه التقنية نجاحا تسويقيا لأغراض التحكم الحرارى وتوفير الطاقة نتيجة احتياجها لتيار كهربى مستمر لتظل شفافه، مما يعنى أن ما ستوفره من طاقة نتيجة التحكم فى النفاذ، ستستهلك الكثير منه فى عملية التحكم نفسها. ومما يعنى أيضا أنها ستتحول للاعتام عند انقطاع الكهرباء، وهو وضع غير آمن نتيجة زيادة الاحتياج للاضاءة الطبيعية فى ظروف الطوارئ.
وقد بدا هذا الزجاج يسوق تجاريا لغرض آخر هو التحكم فى الخصوصية، فيمكن مثلا لمدير فى غرفة زجاجية أن يشاهد موظفية من خلال الزجاج، وأن يعتم الزجاج بضغطة زر عند عقده لاجتماع مغلق.

ب- الحبيبات المعلقة: SPD Suspended Particle Display
وهى تقنية تشبه كثيرا البلورات السائلة، ولكن الفارق أنها تعتمد على حبيبات ميكروسكوبية من مادة صلبة ماصة للضوء، ويتم حصر هذا السائل بين لوحي زجاج مطليين بمادة شفافة موصلة للتيار الكهربى، وعند تمرير تيار كهربى فى اللوحين الموصلين للكهرباء تتراص هذه الجزيئات بشكل منظم يغير من شفافية الزجاج، ويمكن التحكم فى درجة الشفافية بتغير شدة التيار الكهربى.
وتتميز هذه النوعية ميزة التغيير التدريجى لشفافية الزجاج تبعا لظروف التشغيل، وهناك عدة نوعيات منه ، أكثرها اعتماما تقل نفاذيته الضوئية عن ١% وهو مغلق، بينما تصل إلى ٢٢% وهو مفتوح، وهى قيمة قليلة بالنسبة للاستفادة من الاضاءة الطبيعية.
أما أكثرها شفافية فتزيد نفاذيته وهو مفتوح عن ٥٧%، ولكن يعيبه أن النفاذية لا تقل عن ١٢% وهو مغلق، وهو ما لا يجعله صالحا لحفظ الخصوصية.
ورغم انتشار التقنيتين السابقتين على مستوى شاشات الأجهزة الإلكترونية، إلا أنهما تواجهان مصاعب بالنسبة لمساحات الزجاج الكبيرة، بسبب التكاليف من ناحية، وبسبب وجود طبقة سائلة داخل الزجاج تسبب تشوها كبيرا فى حالة تعرضها للضغط أو للتسرب أو عند كسر أو شرخ الزجاج

جـ الهيدريد العاكس:
وهو نوع من الزجاج يعتمد على طلائه بطبقة معدنية عاكسة للضوء، وبتعريض هذه الطبقة لتيار من الهيدروجين يتفاعل مع المعدن مشكلا مادة منفذة جزيئا للضوء غير عاكسة، وبسحب الهيدروجين تعود إلى حالتها الأصلية.
ويمثل حقن الهدروجين بين طبقات الزجاج المطلية بالمادة العاكسة وإعادة سحبها صعوبة وعقبة تعوق المستقبل التسويقى لهذا النوع من الزجاج.

د - الزجاج متغير اللون كهربيا بحقن الأيونات:
وهى تقنية واعدة تتبناها بعض مؤسسات الطاقة الأمريكية، وسجلت بها عددا كبيرا من براءات الاختراع، ويتوقع إذا نجحت جهودهم التسويقية أن تنتشر.
وتبنى فكرة هذا الزجاج على وجود طبقة من مادة كيميائية تغير لونها وخواصها الضوئية وتصبح داكنة، إذا تعرضت لأيونات مادة أخرى، وتعود إلى حالتها الأصلية إذا ابتعدت عن هذه الأيونات.
وليتم ذلك، يتم وضع ثلاث طبقات متتالية، إحداها هى المادة متغيرة اللون، وطبقة تختزن عددا كبيرا من أيونات المادة الثانية، ويفصلها طبقة تسمح بمرور الأيونات فى حالة تعرضها لفرق جهد كهربى.
ولتوفير هذا الجهد يتم حصر الطبقات الثلاثة بين طبقتين من مادة شفافة موصلة للكهرباء، وعند تمرير تيار كهربى مستمر منخفض الجهد تصبح أحد الطبقات سالبة الشحنة والأخرى موجبة، فتعمل أحدهما على جذب الأيونات نحوها بينما تطردها الأخرى، وبذلك تتحرك الأيونات من موقعها الأصلى، (طبقة تخزين الأيونات)، إلى الطبقة متغيرة اللون فتبدأ فى الإعتام، أما فى حالة الرغبة فى إعادة الزجاج للحالة الشفافة، فيتم عكس اتجاه التيار الكهربى فتتحرك الأيونات عائدة إلى مخزنها ويعون لون الطبقة متغيرة اللون للشفافية.
ومن الطبيعى أن الطبقات الخمس المذكورة محصورة بين لوحى زجاج أو بلاستيك شفاف، مما يعنى أن لوح الزجاج من هذا النوع يتكون من ٧ طبقات.
ولم يتم الإنتاج التجارى لهذا الزجاج حتى كتابة البحث، ورغم الحماس الشديد الذى يظهر بين المطورين له، إلا أنه لم يختبر تجاريا بعد، ولم يظهر إن كان سيكون اقتصاديا أم لا.

بالإضافة لذلك، فهذا الزجاج سيكون بحاجة إلى دمجه مع نوعيات أخرى مثل الزجاج منخفض الانبعاثية، حيث أن إعتام الزجاج سيعنى امتصاصه لقدر كبير من الإشعاع الشمسى الذى يمكن إعادة بثه إلى داخل الفراغ فى صورة أشعة تحت حمراء.
ولكن فى حالة انخفاض تكاليف إنتاجه، فمن الممكن أن يكون مغريا للمعماريين (حتى لو كانت به عيوب فى انتقال الحرارة)، نظرا لسهولة إغلاق النوافذ أو فتحها بضغطة زر ودون الاحتياج لستائر داخلية.

جـ الزجاج ذو النفاذية الإنتقائية لإتجاه الأشعة:

وهذا الزجاج فى الحقيقة هو أحد التحديات التكنولوجية التى تواجه الهندسة البيئية حيث لا تزال الأبحاث تجرى فى اتجاهات متعددة 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 يفتح الباب لاستخدامه فى وسائل المواصلات كالسيارات والقطارات أو حتى فى النظارات الطبية والشمسية.
ونظرا لتعقد موضوع الزجاج ذو النفاذية الانتقائية للاتجاه، وأهميته للمعماريين نتيجة امكانية تصميمه بواسطتهم فقد أفرد الباحثان له بحثا خاصا بعنوان:
كاسرات الشمس المصغرة المدمجة داخل الزجاج،
مدخل معمارى لتطوير زجاج ذو نفاذية إنتقائية لإتجاه الأشعة.
يتناول تفصيليا كيفية التعامل مع هذا النوع من الزجاج وتطويره وتصنيعه واستخدامه معماريا.
وتتناول الصفحات التالية ملخصا لعدة تقنيات مستخدمة حاليا أو تحت التطوير للوصول إلى تصنيع زجاج من هذا النوع بتكلفة اقتصادية وبصفات معمارية ملائمة.

الزجاج المتجه غير المتجانس ضوئيا anisotropic

وهو زجاج يعتمد فى انتقائيته للزوايا على عدم تجانس شفافية مواده بالنسبة لاتجاه سقوط الضوء، ويمكن تحقيق ذلك بعدة تقنيات، منها

لزجاج ذو الشوائب المتراصة مغناطيسيا

ويعتمد على وضع برادة الحديد فى الزجاج المنصهر وتعريضها لمجال مغناطيسى قوى فتتراص فى أسطح شبه منتظمة عمودية على سطح الزجاج، فتسمح بمرور الأشعة العمودية على اتجاه الزجاج موازيا لهذه الأسطح، وتمنع . (شكل- ١٠)

التبخير المائل للطبقة العاكسة

وهى طريقة تعتمد على تغطية سطح الزجاج بطبقة عاكسة للضوء، ثم فتح ثقوب بها عن طريق تسخينها لدرجة الغليان فتبدا فقاعات من الغاز فى التكون وتصعد إلى سطح المادة العاكسة المنصهرة، فتشق لنفسها طريقا فى هذه الطبقة يترك أنفاقا عمودية على السطح، تسمح بنفاذ الضوء فى اتجاهها فقط.

الحفر الضوئى لطبقة عاكسة
وهى طريقة تشبه سابقتها فى حفر ثقوب فى الطبقة العاكسة عموديا على سطحها، وان كان ذلك يتم بطريقة فوتوكيميائية بسيطة معروفة تجاريا باسم الزنكوغراف، ورغم سهولة التقنية إلا أن تكاليفها ليست قليلة.
وبشكل عام، لا تزال معضم طرق انتاجى الزجاج غير المتجانس ضوئيا معقدة ومكلفة، ورغم تسجيل عدد من براءات الاختراع، إلا أن أيا منها لم يصل للانتاج التجارى.

الزجاج المتجه المعتمد على الانعكاس
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 بأكثر من طريقة:

الزجاج المنشورى
وفيه يكون أحد سطحى الزجاج مسننا بحيث يتكون اللوح من مجموعة من المنشورات الثلاثية، يصمم سطحه الخارجى بطريقة تسمح بدخول الأشعة إلى الزجاج، ويصمم سطحه الداخلى بطريقة تعكس الزوايا غير المرغوبة. 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 فوق منسوب الرؤية.

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-٧)

الزجاج المجمع على التوازى (القضبان المتجاورة)
يمكن تحقيق وظيفة النوع السابق بتكوين اللوح الزجاجى من قضبان متتابعة مربعة من البلاستيك أو الزجاج، تنحصر بين لوحين من الزجاج العادى، وتعمل الأسطح العمودية على سطح الزجاج ككاسرات شمس نتيجة الانعكاس الداخلى للأشعة. ويمكن 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.

الزجاج المجمع على التوالى (الشرائح المتتابعة)
ينفذ لوح الزجاج العادى الأشعة العمودية بقيمة أكثر من الأشعة المائلة، نتيجة اختلاف انعكاسيته تبعا لزاوية السقوط، ويمكن بوضع أكثر من لوح متتابع (أو وضع أفلام بلاستيكية متتابعة) زيادة هذا التأثير

كاسرات الشمس المدمجة

وهى أشبه بكاسرات شمس مصغرة مدمجة داخل الزجاج أو داخل فيلم شفاف ملصق عليه، تسمح بنفاذ الضوء فى اتجاهات معينة وتمنعه فى اتجاهات أخرى، وقد بدأ تطوير هذه المرشحات منذ الثلاثينيات لأغراض التصوير الفوتوغرافى وأجهزة وشاشات العرض السينمائى، ثم شاشات التليفزيون والشاشات الإلكترونية بشكل عام لزيادة وضوحها.

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. ويمكن تطبيق بعضها معماريا بتعديلات طفيفة، بينما بعضها بحاجة لتطوير جذرى.

ولكن بشكل عام تبدو هذه التقنية ملائمة للمعماريين الذين هم أقدر الناس على تطويرها، بحكم أنها أساسا طرق (جيومترية) للإنتقاء، تعتمد على التصميم الفراغى للكاسرات أو المرشحات الضوئى، أكثر مما تعتمد على كيمياء المواد أو طرق تصنيعها، مع ملاحظة ضرورة الانتباه لتغير اتجاه الأشعة داخل الزجاج نتيجة الانكسار وبالتالى التصميم للانفاذ زوايا نفاذ او حجب مختلفة عن كاسرات الشمس فى الهواء.

التقطيع المتتابع عموديا:

وفيه يتم لصق عدد كبير من الأفلام الشفافة فوق بعضها بمادة لاصقة معتمة، وبعد تصلبها يتم تقطيعها عموديا على اتجاهها الأصلى لتنتج أفلاما جديدة عبارة عن تتابع من شرائح رفيعة شفافة ثم معتمة وهكذا، وهو ما يعنى أن الشرائح المعتمة ستصبح أشبه بأرفف عمودية على سطح الفيلم. (شكل- ٩)

التقطيع المتتابع حلقيا:

ويمكن أن يتم لف الفيلم الشفاف بعد تطية سطحه بالمادة اللاصقة بحيث يشكل لفافة أسطوانية، يتم تقطيعها إلى مجموعة من الدوائر الرقيقة يمثل كلا منها فيلما يحتوى على حلقات معتمة، وبتقطيع عذه الدوائر إلى مربعات وتجميعها يمكن انتاج فيلم ينفذ الضوء العمودى ويحجب الضوء المائل. (شكل- ٩)

الأفلام المخدوشة طوليا:

وهى أفلام يتم خدشها بعمق يصل لنصف سمكها تقريبا ثم ملء الخدش بمادة معتمة، مما يخلق رفا معتما عموديا على سطح الفيلم، وبلصق فيلمين متواجهين يزيد عرض الرف إلى الضعف تقريبا مما يتيح زوايا اظلال أكبر. والتقنية بسيطة ويمكن استخدامها أثناء تصنيع الفيلم أو بعد انتهاءه. (شكل- ١١)

الزجاج ذو زوايا الإظلال المتغيرة

ويتم ذلك بتفيذ احدى التقنيات المذكورة على قيلم من مادة مرنة، ولصقه بين لوحين من الزجاج، يثبت أحدهما بالطار ويبقى الثانى قابلا للحركة البسيطة موازيا للآخر، وينتج عن هذا الحركة تغير شكل الفيلم نتنيجة اجهاد القص وبالتالى تغير زوايا الأرفف المعتمة فيه. وهو ما يغير من زوايا الاظلال.

٤- المقارنة الكمية بين بعض نوعيات الزجاج
وعلاقتها بكود توفير الطاقة فى المبانى

يحاول الكود المصرى لتوفير الطاقة فى المبانى تحقيق التوازن بين هدفين، حيث يجب تقليل مساحة النوافذ أو تقليل نفاذية الزجاج الاجمالية للاشعاع الشمسى لتقليل نفاذ الحرارة إلى داخل الفراغ وتقليل أحمال التبريد، بينما يجب زيادة نفاذية الزجاج للضوء المرئى لزيادة كمية الاضاءة الطبيعية وتقليل أحمال الاضاءة الصناعية.
ومن اجل ذلك يتعامل الكود مع متغيرين كميين رئيسيين يعبران عن كفاءة الزجاج:

النفاذية الشمسية الكلية SHGC (Solar Heat Gain Coefficient)
وهى النسبة بين كمية الطاقة الحرارية التى تصل للفراغ الداخلى مقارنة بالاشعاع الشمسى الساقط على الزجاج من الخارج.
وينص الكود على تحديد حد أقصى مسموح به لهذه القيمة، يتغير بتغير التوجيه، ويقل كلما زادت نسبة الفتحات بالواجهة (جدول-٤)

جدول-٤ متطلبات الكود المصرى للغلاف الخارجى للمبانى المكيفة بالقاهرة، تحدد الحد الأقصى للنفاذية الشمسية الكلية SHGC

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
الاتجـــاه		اللون	الأجزاء المعتمة: المقاومة الحرارية المطلوبة م².س°/وات		الفتحات: نسبة الفتحات بالواجهات: ف ≤ 10%	10% < ف ≤ 20%	20% < ف ≤ 30%	30% < ف ≤ 40%	40% < ف ≤ 50%	ف > 50%	ف ≤ 10%	10% < ف ≤ 20%	20% < ف ≤ 30%	30% < ف ≤ 40%	40% < ف ≤ 50%	ف > 50%	ف ≤ 10%	10% < ف ≤ 20%	20% < ف ≤ 30%	30% < ف ≤ 40%	40% < ف ≤ 50%	ف > 50%
			إنشاء ثقيل	إنشاء خفيف	الحد الأدنى للمقاومة الحرارية المطلوبة R-Value						الحد الأقصى لمعامل الاكتساب الحرارى الشمسى SHGC						الحد الأدنى لنسبة إظلال الزجاج الواجب توافرها على الفتحة SGR				
السطح		داكن	2.2	2.7																	
الحوائط	ش	داكن	0.7	1.2	غ.ط	غ.ط	غ.ط	غ.ط	0.6	غ.ط	غ.ط	غ.ط	غ.ط	غ.ط	غ.ط	غ.ط	غ.ط	غ.ط	غ.ط	غ.ط	غ.ط
		فاتح	0.6	1.1																	
	ش.ق /ش.غ	داكن	1.0	1.5	غ.ط	غ.ط	0.2	0.2	0.2	غ.ط	غ.ط	غ.ط	0.6	0.4	0.2	غ.ط	غ.ط	%25	%50	80 %
		فاتح	0.7	1.2																	
	ق/غ	داكن	1.4	2.5	غ.ط	غ.ط	0.2	0.4	0.4	0.4	0.7	0.4	0.3	0.3	0.2	%10	%50	%60	%65	80 %
		فاتح	0.9	2.0																	
	ج.ق /ج.غ	داكن	2.5	1.2	غ.ط	غ.ط	0.2	0.4	0.7	0.4	0.7	0.4	0.3	0.3	0.2	%20	%55	%65	%70	80 %
		فاتح	0.8	2.0																	
	ج	داكن	0.9	1.8	غ.ط	غ.ط	0.2	0.2	0.4	غ.ط	0.8	0.6	0.4	0.3	غ.ط	%10	%30	%50	%50	60 %
		فاتح	0.7	1.5																	

النفاذية الضوئية Visible Light Transmittance VLT or T_v
و هو النسبة بين كمية الضوء المرئى النافذ من الزجاج مقارنة بكمية الضوء المرئى الساقط عليه

الاضاءة الطبيعية. وتزيد فرصة ذلك إذا زادت عن ٠,٦٠، حيث تزيد زاوية الاظلال المسموح بها من ٤٥ إلى ٦٠ درجة فى حالة نسبة الفتحات التى لا تتعدى ٣٠%، وتزيد من ٦٥ إلى ٧٠ درجة إذا زادت نسبة الفتحات عن ذلك.

جدول-٥ النفاذية الشمسية الكلية والنفاذية الضوئية لنوعيات مختلفة من الزجاج.

نوعية الزجاج	السمك	النفاذية الشمسية الكلية SHGC	النفاذية الضوئية T_v	Glass Type
الزجاج الشفاف العادى	٣ مم	٠,٨٦	٠,٩٠	Clear Glass
	٦ مم	٠,٨١	٠,٨٨	
الزجاج الماص البنى	٣ مم	٠,٧٣	٠,٦٨	Bronze
	٦ مم	٠,٦٢	٠,٥٤	
الزجاج الماص الرمادى	٣ مم	٠,٧٠	٠,٦٢	Gray
	٦ مم	٠,٥٩	٠,٤٦	
الزجاج الماص الأخضر	٣ مم	٠,٧٠	٠,٨٢	Green
	٦ مم	٠,٦٠	٠,٧٦	
الزجاج العاكس (نفاذية٣٠%)	٦ مم	٠,٣٩	٠,٣٠	Reflective (30%)
	الانبعاثية	**SHGC**	**T_v**	
زجاج منخفض الانبعاثية	٠,٦	٠,٥٠	٠,٧٥	Low-E
	٠,٤	٠,٢٩	٠,٧٢	
	الحالة	**SHGC**	**T_v**	
زجاج كهربى (بللورات سائلة)	مغلق	غير متاح	٠,٤٥ (ضوء مشتت)	Liquid Crystal
	مفتوح	غير متاح	٠,٧٠	
زجاج كهربى (حبيبات عالقة) داكن	مغلق	٠,١٩	٠,٠٠٥	Electrified SPD
	مفتوح	٠,٤٠	٠,٢٢	Light
زجاج كهربى (حبيبات عالقة) فاتح	مغلق	٠,٣١	٠,١٢	Electrified SPD
	مفتوح	٠,٦٠	٠,٥٧	dark

وفى حالة وجود مبانى مقابلة للواجهة، إذا زادت زاوية اظلالها على ٤٥° وكانت نسبة الفتحات فى حدود ٣٠% أو زادت زاوية الاظلال عن ٦٥° مع نسبة فتحات أكبر من ٣٠%، يجب أن تزيد النفاذية الضوئية إلى ٠,٦.

ويعرض جدول-٥ قيم النفاذية الشمسية والضوئية لعدة أنواع من الزجاج، وهذه القيم ذات قدر مقبول من الدقة تصف نوعية الزجاج بشكل عام دون تحديد علامة تجارية معينة أو منتج محدد، أما عند الرغبة فى تحديد خواص زجاج محدد من منتج محدد فيمكن اللجوء إلى بيانات المنتج، والأفضل اللجوء لاستخدام برنامج Optics الذى صممه معمل لورنس بيركلى، والذى يضم

قاعدة معلومات ضخمة عن كل نوعيات الزجاج المتوافرة تجاريا، وخواصها الضوئية الحرارية والضوئية بالتفصيل. و هو متاح مجانا على شبكة المعلومات الدولية.
وهذه الأرقام المذكورة هى أرقام ذات قدر مقبول من الدقة تصف نوعية الزجاج بشكل عام دون تحديد علامة تجارية معينة أو منتج محدد، أما عند الرغبة فى تحديد خواص زجاج محدد من منتج محدد فيمكن اللجوء إلى بيانات المنتج، والأفضل اللجوء لاستخدام برنامج Optics الذى صممه معمل لورنس بيركلى، والذى يضم قاعدة معلومات ضخمة عن كل نوعيات الزجاج المتوافرة تجاريا، وخواصها الضوئية الحرارية والضوئية بالتفصيل. و هو متاح مجانا على شبكة المعلومات الدولية.

النتائج

- النافذة عنصر معمارى ذو وظائف كثيرة جدا قد يتناقض بعضها مع الآخر، لذا تحتاج للتعامل الواعى معها، وخاصة تحقيق التوازن بين المتطلبات البيئية المختلفة، مع عدم اهمال باقى الجوانب التصميمية غير البيئية (الرؤية، الخصوصية، الجماليات...)
- ينصب تركيز التصميم البيئى للزجاج على تحقيق التوازن بين متطلبات الاضاءة الطبيعية والمتطلبات الحرارية، وهو ما يحاول الكود المصرى لتوفير الطاقة فى المبانى تحقيقه، حيث يحاول تقليل نفاذ الحرارة إلى داخل الفراغ بتقليل مساحة النوافذ أو تقليل نفاذية الزجاج للاشعاع الشمسى **SHGC** ، بينما يحاول زيادة كمية الاضاءة الطبيعية بزيادة نفاذية الزجاج للضوء المرئى $\mathbf{T_{vis}}$.
- هناك عدة أنواع من الزجاج القادر على تقليل الكمية المارة من الإشعاع الشمسى بشكل عام، كما توجد نوعيات من الزجاج أكثر تقدما يمكنها الانتقاء بين زيادة النفاذية أو اقلالها تبعا للظروف، وتقع هذه النوعيات فى ثلاث فئات رئيسية تضم كل منها عدة أنواع، أولها الزجاج ذو النفاذية الانتقائية للطول الموجى، وثانيها الزجاج متغير النفاذية، وثالثها الزجاج ذو الانتقائية لزاوية.
- فى حالة استخدام الزجاج الماص كوسيلة لتحقيق النفاذية الانتقائية للطول الموجى، يفضل الزجاج الأخضر او الأخضر المزرق نظرا لانتقائيته العالية فى انفاذ الضوء المرئى وامتصاص الاشعة تحت الحمراء، وخاصة أن سعره لا يختلف كثيرا عن الألوان الأخرى من الزجاج الماص.
- يفضل عدم استخدام الزجاج الماص البنى أو الرمادى على الاطلاق، حيث لا يقلل من نفاذ الحرارة بقدر ما يقلل من نفاذ الضوء، واستخدام زجاج أبيض بمساحات صغيرة يحقق أداءا أفضل!
- الزجاج منخفض الانبعاثية يمكنه تقليل الاشعاع الحرارى النافذ دون تأثير كبير على الضوء المرئى.
- أفضل نوعيات الزجاج المنتقى للطول الموجى هى الزجاج الأخضر منخفض الانبعاثية.
- فى المناخ الحار، يجب أن تكون الطبقة منخفضة الانبعاثية من الداخل، أما الطبقات العاكسة فيفضل أن تكون من الخارج.
- الزجاج الكهربى هو مجال الاهتمام الرئيسى فى أبحاث التطوير حاليا، وخاصة حقن الأيونات.

- هناك أنواع من الزجاج الكهربى وصلت للانتاج التجارى، وهى البللورات السائلة والحبيبات العالقة، ولكنها لا تحقق وفرا كبيرا فى استخدام الطاقة مقارنة بتكاليفها، وإن كانت سهولة فتحها وغلقها تجعلها تعمل كبديل جيد للستائر، بالاضافة لابهار فكرة الزجاج الذى يغلق ويفتح بضغطة زر.
- 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.

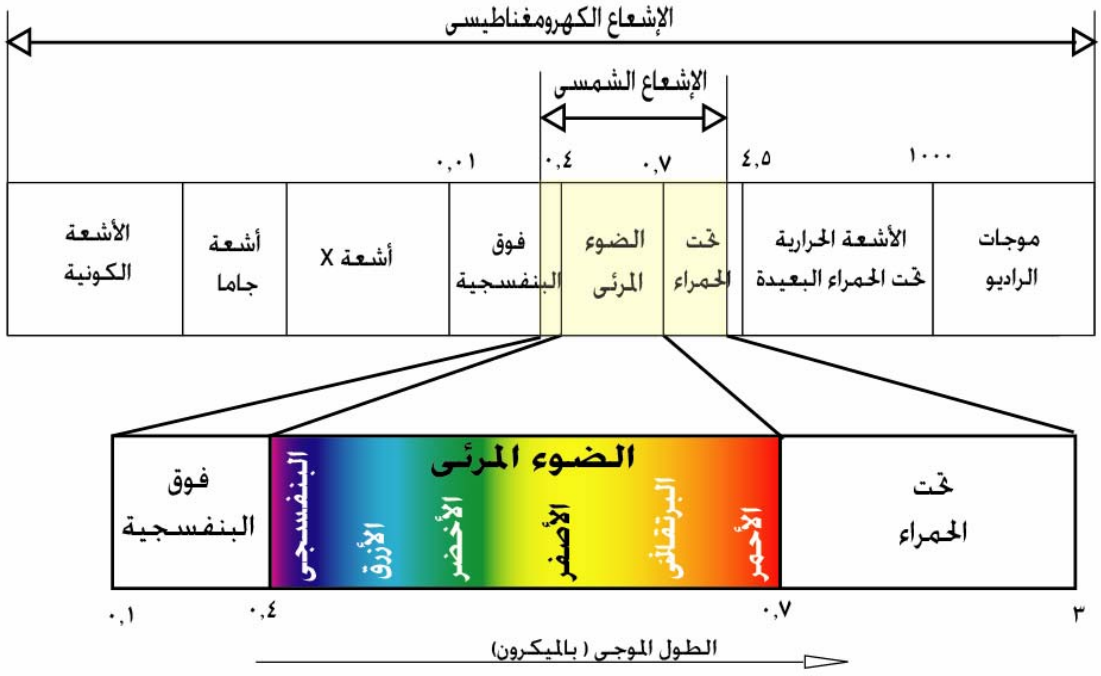
التوصيات

- على المعمارى متابعة الأبحاث الجديدة فى مجال الزجاج، حيث أنه مجال واسع وسريع التطور، وشديد التأثير على القرارات البيئية والتصميمية للمعمارى، فان لم يستطع فعليه استشارة معمارى متخصص فى العمارة البيئية.
- 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.
- تركيز المعماريين على البحث فى مجال الزجاج ذو الانتقائية لزاوية السقوط نظرا لخبرتهم فى تصميم كاسرات الشمس.

خاتمة

- هذا البحث محاولة لتجميع وتصنيف عدد كبير من التقنيات المستخدمة فى الزجاج، وربطها بالأساس النظرى الفيزيائى الذى بنيت عليه، وهو أبعد ما يكون عن الشمول الذى يحتاج لكتاب كامل أو أكثر. ولكنه مجرد محاولة لفتح طريق للمعماريين –خاصة البيئيين منهم- للتعامل مع هذا الموضوع المعقد بفهم أعمق، سواء على المستوى البحثى أو العملى.

شكل-١
الاشعاع الشمسى والحرارى وعلاقتها بباقى أنواع الاشعاع الكهرومغناطيسى

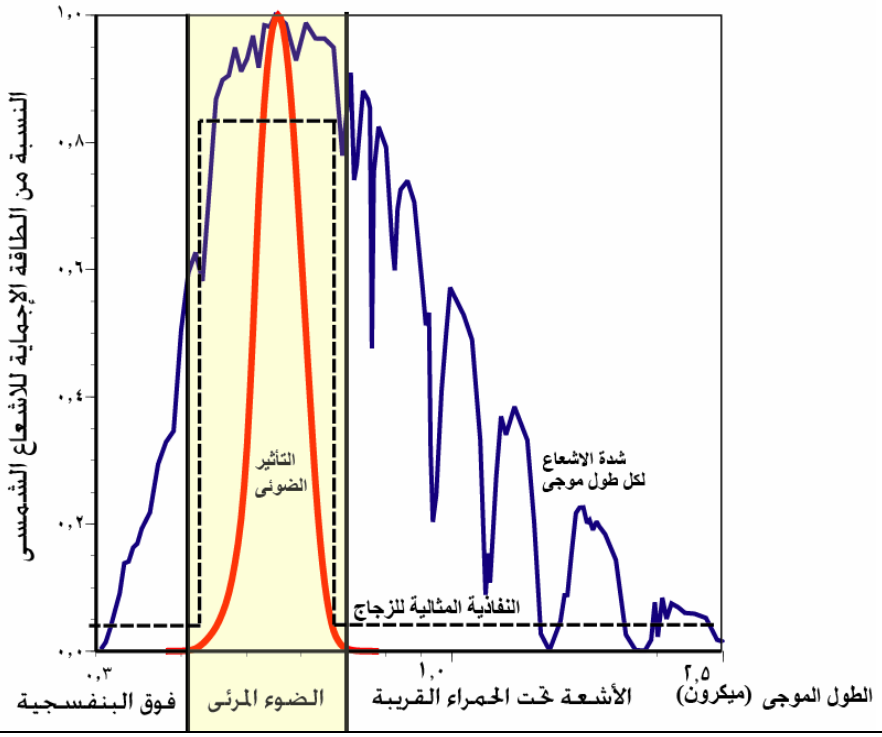


شكل-٢

توزيع الطاقة والتأثير الضوئى للأطوال الموجية فى الاشعاع الشمسى

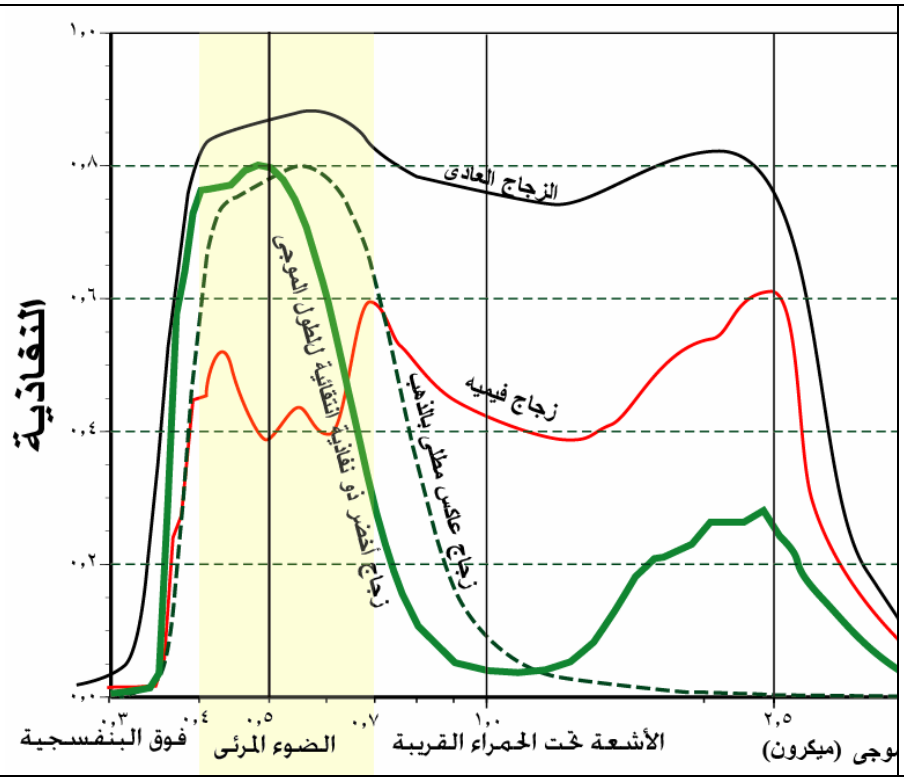
توزيع الطاقة:
الضوء المرئى (٤٧%) والأشعة فوق البنفسجية (٣%) والأشعة تحت الحمراء (٥٠%).

التأثير الضوئى
للألوان المختلفة على العين البشرية التى تبلغ حساسيتها القيمة القصوى للون الأصفر

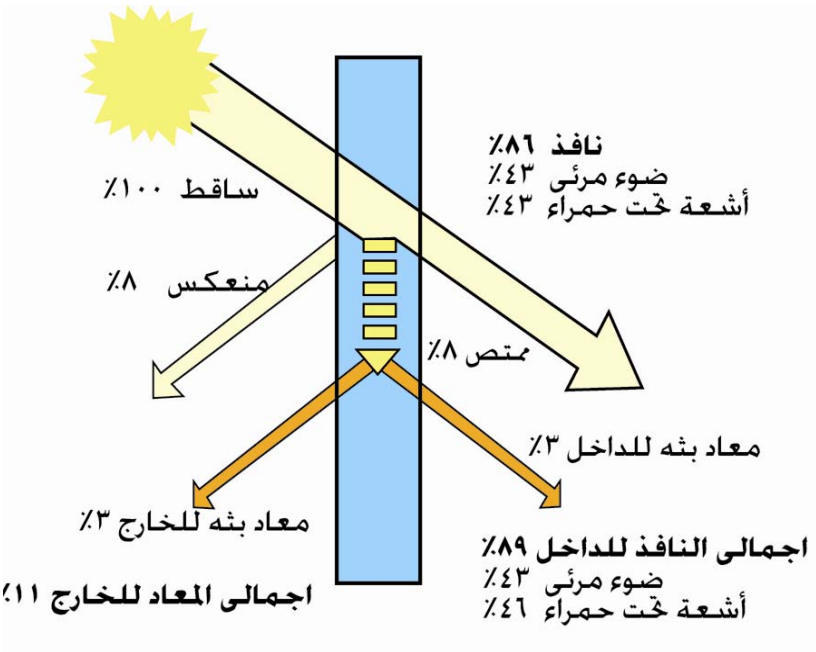


شكل-٣

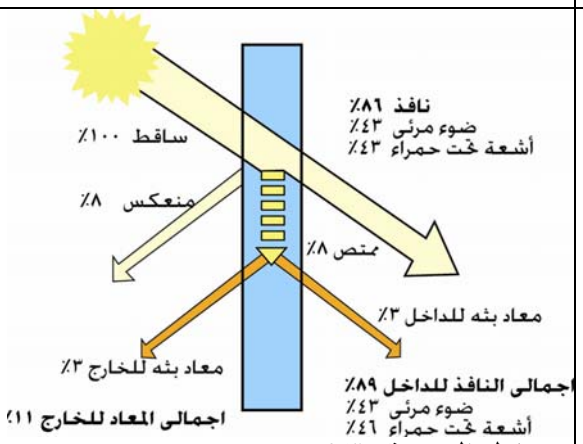
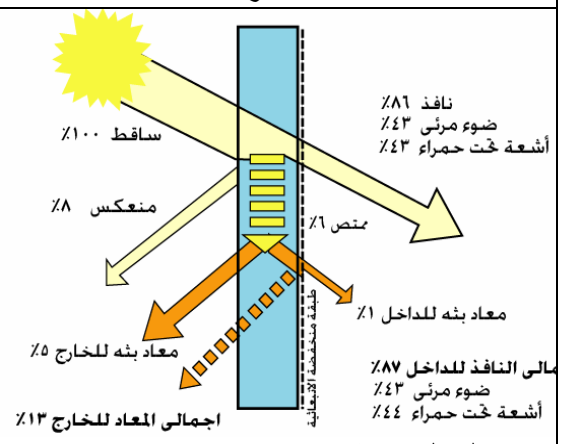
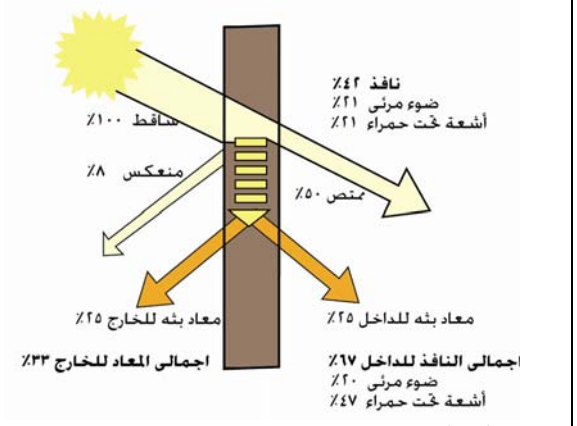
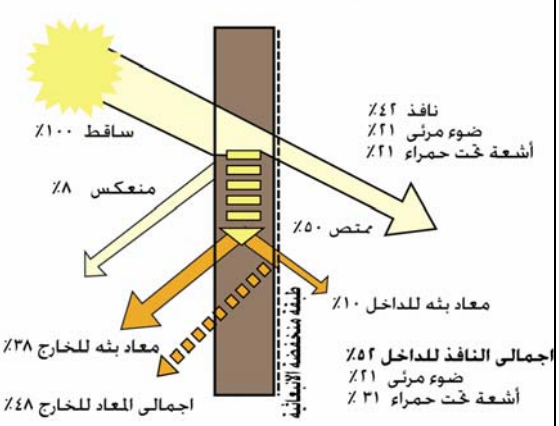
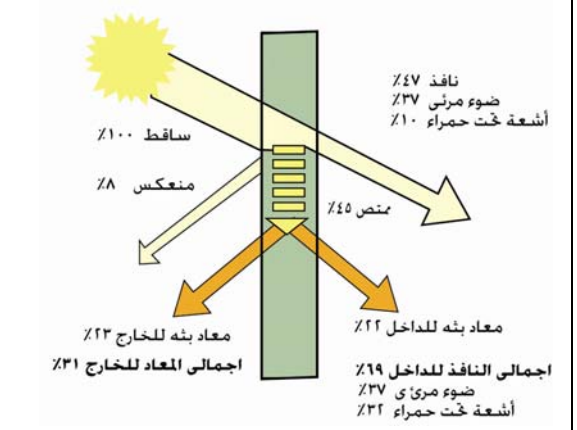
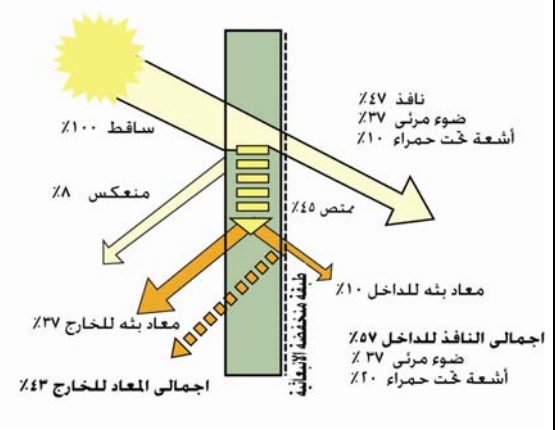
نفاذية الزجاج للأطوال الموجية المختلفة للاشعاع الشمسى



شكل -٤ مرور الاشعاع الشمسى من الزجاج العادى



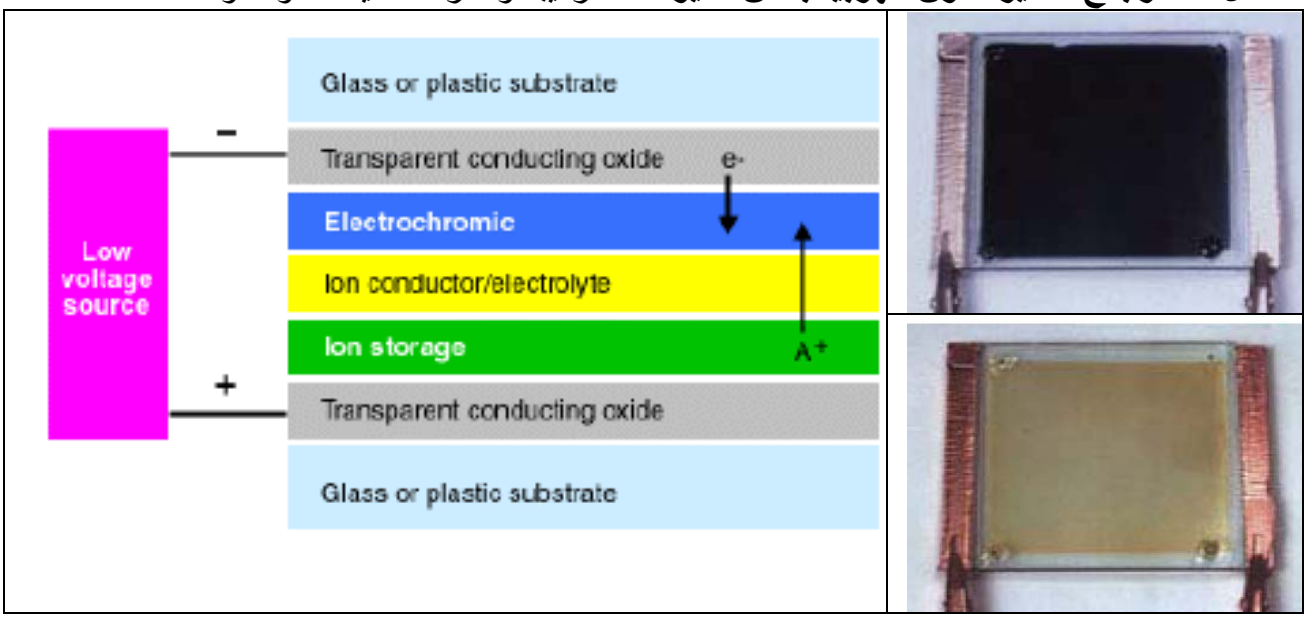
شكل-٥ مقارنة بين النفاذية الشمسية الكلية لنوعيات مختلفة من الزجاج الماص ونفاذيته الانتقائية للأشعة تحت الحمراء والضوء المرئى.

	الزجاج الشفاف	الزجاج منخفض الانبعاثية للاشعة تحت الحمراء
الزجاج العادى	 معامل البرودة: ٠,٩٣	 معامل البرودة: ٠,٩٩
الزجاج الماص البنى (القيمية)	 معامل البرودة: ٠,٤٢	 معامل البرودة: ٠,٦٧
الزجاج الماص الأخضر	 معامل البرودة: ١,١٦	 معامل البرودة: ١,٨٢

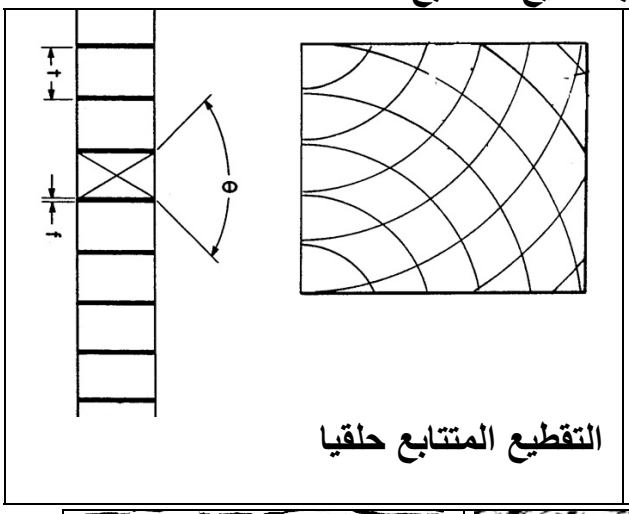
شكل-٦ الزجاج **الكهربى ذو البللورات السائلة**، عند غلقه أو فتحه كهربيا.

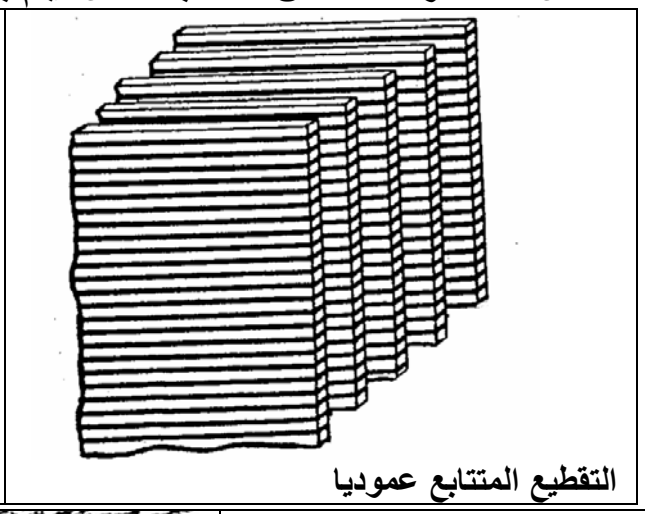
شكل-٧ الزجاج **الكهربى ذو الحبيبات المعلقة**، عند تغيير نفاذيته كهربيا.

شكل-٨ الزجاج متغير اللون كهربيا بحقن الأيونات، تركيبه ومقارنة نفاذيته مفتوحا ومغلقا.

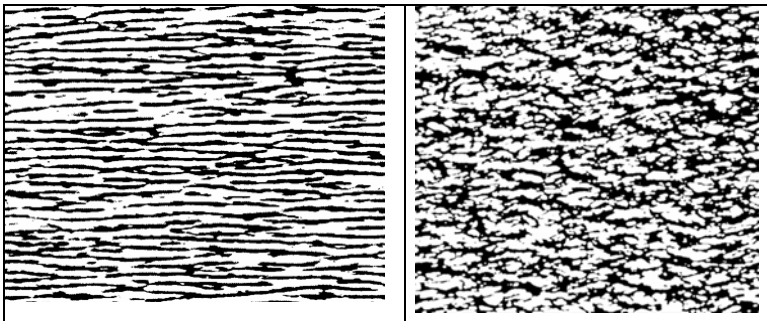


شكل-٩ كاسرات الشمس المدمجة داخل فيلم بالتقطيع المتتابع



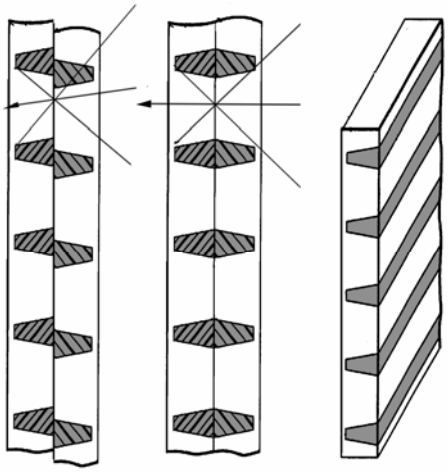


شكل-١٠ صورة ميكروسكوبية لقطاع فى الزجاج ذو الجزيئات المتراصة مغناطيسيا يوضح التوزيع الطبيعى حبيبات برادة الحديد داخل الزجاج وتوزيعها شبه المنتظم بعد تعرض الزجاج المنصهر لمجال مغناطيسى



شكل- ١١الزجاج المقطع بالليزر

شكل-١٢ تشكيل كاسرات الشمس المدمجة بالخدش العميق للأفلام الشفافة



المراجع

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

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

5- Brian M. Deal, Robert J. Nemeth, and Lee P. DeBaille: Energy Conservation Strategies for Windows and Glazed Surfaces, US Army Corps of Engineers, Construction Engineering
Research Laboratories, USACERL Technical Report 98/74, July **1998**

6- Cardinal Glass industries: Cardinal loE 172, Low emissivity glass data sheet, 2006
http:/www.cardinalcorp.com/products_coated_272/272.htm

7- LBNL Building Technology Department: Low-Emittance and Solar-Control Glazing, 2005
http://windows.lbl.gov/materials/low-e/default.htm

8- LBNL Building Technology Department: Chromogenic Materials, 2005
http://windows.lbl.gov/materials/chromogenics/default.htm

9- U.S. Department of Energy, LBNL, National Fenestration Rating Council : International Glazing Database v 15.0, 10-2006
http://windows.lbl.gov/materials/IGDB/default.htm

10- FEMP federal Energy Management Program : Low-Energy Building Design Guidelines, Energy-efficient design for new Federal facilities, E DOE/EE-0249, The U.S. Department of Energy, Berkely CA, **2001**.

11- FEMP federal Energy Management Program : **Spectrally Selective Glazings,** ***A well proven window technology to reduce energy costs while enhancing daylight and view,*** Federal Technology Alert, DOE/EE-0173, The U.S. Department of Energy, Berkely CA, **1998**.

12- HBRC; Housing & building Research Centre, OEP: Egyptian Energy Efficiency Commercial Building Code, Ministry of housing, Cairo, **2005**.