" الأسس التكنولوجية لاستخدام النحت الزجاجي المعاد تشكيله حرارياً في التكسيات الجدارية بعمارة المساجد "

بحث مقدم إلى المؤتمر الدولي الثالث للعمارة والفنون الإسلامية من :

أ.م.د/ حسام الدين نظمي حسني **

- المحور الثالث : أسس تخطيط المساجد وتصميمها

- المقدمة وموضوع البحث :

المساجد هي بيوت الله في الأرض وهي أحد المتطلبات الهامة للعقيدة الإسلامية ، وقد تطورت عمارة المساجد على مر الزمان من مجرد مبنى بسيط يحتوي على مجموعة من العناصر الأساسية (جدار القبلة – الصحن المكشوف – الأروقة المسقوفة – المنبر) (م ٤، ص ١٣٦) أضيف إليها بعد ذلك المئذنة والميضأة ؛ إلى عمارة أكثر تميزاً وارتباطاً بالبيئة المكانية والزمانية ، فقد نجحت عمارة المساجد في خلق تعبير معماري جديد عن طريق تشكيل وتنظيم العناصر التركيبية والإنشائية التي وجدت في العمائر القديمة (م ١ ، ص ٣٣٥) بشكل جديد متغير ساعد على تفرد عمارة المساجد لتعطي جواً معمارياً خاصاً كمباني لها خصوصية دينية ووظيفة تعبدية أدت إلى توحد برنامجها وعناصرها المعمارية .

وتعتبر التكسيات الجدارية أحد العناصر المعمارية الهامة في عمارة المساجد ، حيث تطور استخدامها لتشمل الجدران الخارجية والداخلية للمسجد ، وكذلك الأطر المحيطة بالفتحات المعمارية (الأبواب والنوافذ) ، وكذا حول المحاريب وفي الأسقف والقباب .

وقد تباينت العناصر الفنية المكونة للتكسيات الجدارية من زخارف هندسية ونباتية وكتابات ، كما تنوعت الخامات المستخدمة في تكوين هذه التكسيات الجدارية والأشرطة الزخرفية النحتية لتشمل الجص والخشب والحجر والمعدن ، وقد كانت خامة الزجاج بمناً تاماً عن استخدامها في هذا المجال بالرغم من إمكانياتها الكبيرة كخامة على مستوى التفرد في تحقيق القيم الجمالية المتميزة متمثلة في عناصر الشفافية والضوء واللون ، إضافة إلى قدرتها الكبيرة لتحمل العوامل البيئية المختلفة التي تؤثر على غيرها من الخامات ، وتعد تقنية تشكيل التكسيات الجدارية والأشرطة الزخرفية النحتية بإعادة التشكيل الحراري للزجاج أحد التقنيات الهامة التي سوف تحقق نجاحاً كبيراً في ذلك المجال بما يتطلب معه دراسة أساسياتها التقنية المؤثرة .

ومن هنا فإن **مشكلة البحث** تحاول الإجابة عن عدة تساؤلات منها : هل يمكن استخدام تقنية إعادة التشكيل الحراري في تشكيل جداريات نحتية وأشرطة زخرفية بارزة وغائرة للعمارة الداخلية والخارجية للمساجد ؟ ، وما هي أهم مميزات استخدام الزجاج كخامة تحوي العديد من القيم الجمالية والوظيفية في هذا المجال ؟ ، وما هي أهم الأسس التكنولوجية لتشكيل الجداريات النحتية بتقنية إعادة التشكيل الحراري للزجاج بداية من تشكيل النموذج ، ثم تنفيذ القالب الحراري ، وانتهاءً بإعادة التشكيل الحراري والتشطيب ثم التركيب ؟ ، ومن هنا فإن **هدف البحث** هو دراسة كيفية استخدام الزجاج النحتي المعاد تشكيله حرارياً في التكسيات الجدارية والأشرطة الزخرفية بعمارة المساجد ، مع وضع أهم الأسس التقنية لتشكيلها . و**يفترض البحث** أنه يمكن استخدام الزجاج النحتي المعاد تشكيله حرارياً في التكسيات الجدارية بعمارة المساجد من خلال دراسة أهم الأسس التكنولوجية المؤثرة في المراحل المختلفة للتقنية ، وتتم هذه الدراسة من خلال عدة محاور تضم :

١- التكسيات الجدارية بعمارة المساجد (أشكالها وأنواعها) :

تتنوع العناصر المعمارية بالمساجد ما بين عناصر أساسية مثل : (المحراب ، الصحن ، المنبر ، الرواق ، العقود ، الأعمدة ، المآذن ، القباب)، وأخرى إضافية مثل : (الشرفات ، المقرنصات ، الكرانيش ، الجفوت ، الكوابيل ، البانوهات ، الزخرفة) ، وقد كان لتلك العناصر الدور الرئيس في إضافة الكثير من القيم الجمالية والفنية لعمارة المساجد ؛ من خلال إضفاء المزيد من الجلال والجمال الروحي ، عن طريق إظهار الجمال في هيئتها أو زخرفتها بأساليب متنوعة تربط تلك

** أستاذ مساعد بقسم الزجاج – كلية الفنون التطبيقية – جامعة حلوان .

العناصر ، وتظهر إبداع الفنان المسلم وإيمانه العميق بأهمية ما يقوم به بدافع من الإيمان المطلق بقيمة الإحساس بملامح الجمال ؛ ففيه تسبيح وتكبير يعلي قيم حب الجميل ، ويرقى بالذوق العام نحو التربية والإحساس الجمالي - دون تكلف قد يفتن المصلين ويؤثر على عبادتهم - بل هو يزيد من الشعور بقدسية المكان وما يوقعه في النفس من شعور ديني عميق .
وقد كانت الزخارف والحليات أحد العناصر الجمالية لعمارة المساجد ؛ فكانت الزخارف المصورة أو المنحوتة على الجدران والأعمدة وتيجانها والقباب والأسقف وغيرها ، وشملت زخارف هندسية مجردة ونباتية محورة وكتابات متنوعة ؛ مصنوعة من الجص البارز (في الواجهة) أو الجص المفرغ (في النوافذ) (م ٣ ، ص ٥٦)، وقد اعتمد الفنان المسلم على عنصري التكرار والتوازن لإحداث أثر زخرفي جمالي (م ٢ ، ص ١٣٢) .

ويشار إلى التكسيات الجدارية في هذا البحث باعتبارها أحد العناصر الهامة التي تتدرج في انتشارها بالعناصر المعمارية الأساسية والإضافية بعمارة المساجد ، حيث تشمل جميع التشكيلات النحتية البارزة والغائرة الموزعة في تلك العناصر ؛ سواء على الجدران كبانوهات أو أشرطة زخرفية ، أو القباب ، أو المقرنصات ، أو الكرانيش . وقد تأخذ أشكال التكسيات الجدارية الهيئة المبسطة التي تعتمد على تشكيل بارز وغائر مبسط كما في الإطارات المحيطة بالفتحات المعمارية أو أشكال أكثر تجسيماً وتعقيداً كما في المقرنصات والكرانيش والكوابيل .
وقد تتكون هذه التكسيات الجدارية كأشكال زخرفية لتؤدي وظائف جمالية في المقام الأول ، كما قد تدخل كوظائف استخدامية وإنشائية أيضاً عند استخدامها في تيجان الأعمدة وأطراف العقود ، وتتنوع الخامات المستخدمة في التكسيات الجدارية النحتية لتشمل الجص والخشب والحجر والمعدن بشكل أساسي ، إلا أن استخدام خامة الزجاج في ذلك المجال لا يظهر له وجود لصعوبة إنتاج الزجاج في عصور سابقة لتحقيق نفس القيم التشكيلية للخامات الأخرى ، ويعتمد البحث على اقتراح توظيف الزجاج للتشكيل النحتي بالعناصر المعمارية المختلفة لعمارة المساجد .

٢- مميزات استخدام الزجاج كخامة في تشكيل التكسيات الجدارية بعمارة المساجد:

تدخل العديد من الخامات في تشكيل العناصر المعمارية المتمثلة في التكسيات الجدارية لعمارة المساجد ، وتعد الخامة المكونة للشكل أحد العناصر الهامة في تحقيق القيم الوظيفية والجمالية ، ومن هنا كان احترام أهم خصائص الخامة لتحقيق الدور الأمثل على المستوى الاستخدامي والجمالي ، وتدخل العديد من الخامات في تشكيل العناصر المعمارية الأساسية والإضافية بعمارة المساجد ، ويعتمد ذلك على مدى توافر هذه الخامات وسهولة تشكيلها ، إضافة إلى ملاءمتها البيئية ، ويخضع كل ذلك لمظلة عامة لتحقيق الوظائف الأساسية لتلك العناصر .
ويعد الزجاج كخامة أحد الأهداف المستقبلية للتوظيف في الجداريات النحتية والفتحات المعمارية بعمارة المساجد ، حيث تكمن أهم مميزات الزجاج في التالي :

- الشفافية : حيث يتميز الزجاج بإمكانية إمرار نسبة من الضوء (الشفافية) من خلاله ، وذلك يميز الزجاج عن غيره من الخامات ، ويعطي الفرصة لتوظيف الجداريات النحتية بالمساجد لإمرار الضوء الطبيعي أو الصناعي إلى داخل المسجد بنسب محددة طبقاً لخواص الزجاج المستخدم ، فتتدرج خواص الزجاج الضوئية ما بين الشفافية ونصف الشفافية والإعتام ، وذلك في جزء أو في كل العمل طبقاً للمتطلبات الجمالية والوظيفية له .
- اللون : يسهل استخدام زجاج ملون بدرجات وقيم ظلية متنوعة ؛ بما يزيد من القدرة على تحقيق التناغم والانسجام بين الجداريات النحتية الزجاجية والعمارة الداخلية بالمكان .
- السمك : يتحكم سمك النحت الزجاجي في طريقة إظهار القيم النحتية البارزة والغائرة ، حيث تتنوع درجات اللون باختلاف السمك .
- سهولة التشكيل : يتميز الزجاج المنفذ بإعادة التشكيل الحراري بسهولة التشكيل ، حيث يعتمد على قوالب تشكيل متنوعة تعطي الفرصة لإنتاج وحدات زخرفية نحتية متكررة توظف في عناصر معمارية مختلفة .
- الملاءمة البيئية : يعتبر الزجاج أحد الخامات الهامة التي تقاوم العوامل الجوية ، ولا تتأثر باختلاف درجات الحرارة والرطوبة ؛ مقارنة بكثير من الخامات الأخرى مثل الخشب والجص .

٣- استخدام تقنية إعادة التشكيل الحراري للزجاج في التشكيل النحتي:

تعد عملية إعادة التشكيل الحراري للزجاج أحد الطرق الهامة لتنفيذ منتجات زجاجية متنوعة الاستخدام ، وهي عبارة عن تعريض الزجاج بصوره المختلفة (مسطحات زجاجية – كتل – أجزاء – حبيبات) لدرجات حرارة عالية تسهم في إعادة تشكيل الزجاج ليأخذ هيئة مغايرة طبقاً للمستوى الحراري المستخدم .

والنحت الزجاجي يمكن أن يتم تشكيله بأساليب تقنية متنوعة منها التشكيل من المصهور الزجاجي فيما يعرف بالتشكيل بالصب Casting ، أو بصهر الزجاج باستخدام قوالب محددة بإعادة تشكيل الزجاج حرارياً ، وتعد تقنيتي صهر الزجاج في قوالب Casting ، Pâte de verre من التقنيات الأساسية التي يمكن استخدامها في تشكيل التكسيات الجدارية النحتية الزجاجية بعمارة المساجد ، وسوف يتحدد هذا البحث في دراسة تلك التقنيتين فقط لتشكيل الزجاج .

وتستخدم تقنية الصهر Casting لتنفيذ النحت الزجاجي بإعادة التشكيل الحراري لمسطحات زجاجية أو أجزاء أو كتل أو شرائح داخل قالب حراري ، أما تقنية الصهر Pâte de verre فيتم فيها التشكيل باستخدام حبيبات أو قطع زجاجية صغيرة توضع داخل قوالب حرارية للتشكيل ؛ إما بالصهر الجزئي حتى درجة التصاق الحبيبات ، أو الصهر التام للزجاج .

وتختلف درجة الحرارة المستخدمة للتشكيل في كلا الطريقتين ، حيث تبلغ درجة حرارة التشكيل في طريقة الإنتاج بالصهر Casting فيما بين (٨٣٥ – ٩٥٠ °س) (م ١٢ ، ص ١٠٦) ، بينما في طريقة الإنتاج بصهر الحبيباتPâte de verre تبلغ درجة حرارة التشكيل ما بين (٧٠٠ – ٨٠٠ °س) (م ١٢ ، ص ١١٤) .

٤- الأسس التكنولوجية لتشكيل التكسيات الجدارية النحتية الزجاجية :

تتنوع الأسس التكنولوجية لتشكيل النحتيات الزجاجية بطرق إعادة التشكيل الحراري للزجاج ، حيث تختلف هذه الأسس طبقاً لطريقة الإنتاج ومراحل تشكيل النموذج وقالب التشكيل وصولاً إلى التشكيل الحراري والتشطيب والتركيب ، وتتشابه هذه الأسس التكنولوجية في بعض مراحل التقنيتين محل الدراسة وتختلف في مراحل أخرى ، وعلى ذلك فإن الدراسة تتناول وضع هذه الأسس لكلا التقنيتين معاً في حالة التشابه ، وعند الاختلاف يتم التخصيص لكل تقنية على حدة ، وتضم هذه الأسس ما يلي :

أولاً : أسس تشكيل النماذج (الخامات والأساليب) :

يعتبر تشكيل نموذج المنتج الزجاجي النحتي أحد المراحل الهامة في تنفيذ الجداريات النحتية والعناصر المعمارية لعمارة المساجد ، فيتم تشكيل النموذج من عدة **خامات** طبقاً لشكله وتفاصيله وحجمه وهيئة التشكيل البارز والغائر به ؛ حيث يمكن استخدام الطين أو الصلصال كخامات سهلة التشكيل في تنفيذ النموذج ، كما يمكن تشكيل النموذج من مواد صلبة مثل الجبس أو الخشب ، وفي حالة وجود تشكيلات نحتية بارزة وغائرة بها نتوءات Under cuts يصعب فصلها عن القالب ، فإنه يفضل تشكيل النموذج من الشمع (بطريقة مباشرة أو غير مباشرة) * ، أو يمكن تشكيل النموذج من مواد مخلقة لينة مثل السليكون أو المطاط † ، ويمكن في حالة الوحدات المتكررة تشكيل نموذج من مواد صلبة تتحمل الاستخدام المستمر مثل النماذج المشكلة من البولي استر مع ألياف الفيبر جلاس .

ويعتمد اختيار خامة النموذج على عدة عوامل تضم :(م ٥ ، ص ٣٩)

- سهولة التشكيل .
- الرغبة الذاتية في استخدام الخامة طبقاً للإحساس بها وإمكانية التعبير الفني باعتبارها وسيلة التعبير .
- حجم النموذج .
- خواص الخامة الملائمة للتشكيل والاستخدام .
- زمن التشكيل .
- جودة السطح بعد التشكيل .

---

*يمكن تشكيل النموذج بالنحت المباشر لكتلة من الشمع ، كما يمكن تشكيله على عدة مراحل تبدأ بتشكيل نموذج من الطين يصب فوقه قالب جصي ، ومن ثم يشكل النموذج الشمعي من القالب الجصي .

†تستخدم نماذج السليكون أو المطاط في حالة وجود Under cuts ، كما تستخدم في حالة الرغبة لتشكيل وحدات متكررة من القوالب الحرارية لإنتاج الزجاج بإعادة التشكيل الحراري .

- الملمس والتفاصيل الدقيقة التي يمكن أن تشكل من خلالها .
- سهولة فصلها عن القالب الحراري بعد صبه .

وتتنوع **أساليب تشكيل** نماذج التكسيات الجدارية الزجاجية التي يمكن استخدامها في عمارة المساجد طبقاً للخامات المستخدمة للنماذج والأغراض الجمالية والوظيفية لهذه التكسيات ، ويمكن تقسيم هذه الأساليب إلى عدة عناصر منها :

- تشكيل النموذج بالحذف (الإزالة) : حيث يستخدم لذلك الغرض خامات ذات درجة من الصلابة (ألواح البولي يوريثان – الجص – الخشب – الرخام) يتم تشكيلها إما بالتشكيل اليدوي باستخدام أدوات نحت خاصة تناسب كل خامة ، أو باستخدام معدات أو مخارط (طبقاً لشكل النموذج) ، وقد يتم التشكيل بأساليب أكثر حداثة باستخدام ماكينات النحت الرقمي أو الحفر بالليزر .
- تشكيل النموذج بالإضافة : ويستخدم لهذا الغرض خامات مرنة سهلة التشكيل مثل الطين أو الصلصال أو الشمع*، ويتم التشكيل باستخدام أدوات يدوية للحصول على النموذج المطلوب .
- تشكيل النموذج بالحذف والإضافة : ويستخدم هذا الأسلوب في بعض أنواع النماذج التي تتطلب تشكيل أولي بالحذف ، ثم تجرى عليه عمليات إضافة لإعطاء ملامس أو تشكيلات نحتية متنوعة ، وقد تستخدم لذلك الغرض عدة خامات معاً .

كما يمكن وضع عدة أسس لأساليب تشكيل النماذج بالاعتماد على الأغراض الوظيفية لها ومنها :

- أسلوب تشكيل النموذج بغرض الاستخدام الواحد : وفي هذه الحالة يتم تشكيل النموذج عادة من خامة لينة مثل الطين ، ويتم التخلص من خامة النموذج بعد صب القالب الحراري عليه
- أسلوب تشكيل النموذج بغرض الاستخدام المتكرر : ويستخدم لهذا الغرض خامات صلبة كالجص لتشكيل النموذج مباشرة ، كما قد تستخدم خامات لينة كمرحلة أولى للتشكيل ، ثم يتبعها صب قالب خارجي (من جزء واحد أو مجزأ طبقاً لشكل النموذج) من مادة صلبة كالجص ، ويليها تنفيذ نموذج نهائي صلب (من الجبس أو البولي استر) بعد تشكيله داخل القالب الخارجي ، كما يمكن استخدام نماذج لنفس الغرض من البلاستيك الرقيق المشكل حرارياً Vacuum-formed Plastic . (م ١١ ، ص ١٤٧)
- أسلوب تشكيل النموذج ذو التفاصيل النحتية المركبة Under cuts : ويتم استخدام هذا الأسلوب عن طريق تشكيل أولي من خامة لينة مثل الطين ، وصولاً إلى تشكيل قالب عكسي من مواد مخلقة مرنة مثل السليكون أو المطاط ؛ يتم فيه تشكيل نموذج نهائي من الشمع ، والذي يصب عليه لاحقاً القالب الحراري فيما يعرف بقالب الشمع الهالك.

وعلى هذا فإن تشكيل نموذج التكسيات الجدارية النحتية لعمارة المساجد سواء كانت على هيئة جداريات زخرفية منفصلة ، أو شرائط زخرفية نحتية مستمرة أو إطارات زخرفية نحتية حول الفتحات المعمارية ؛ كل تلك العناصر يمكن أن تشكل باستخدام نماذج مسطحة † مستوية بأسلوب الحذف أو الإضافة ، وإن كان أسلوب الحذف أكثر استخداماً في حالة التشكيلات النحتية الدقيقة ، أما عند تشكيل المقرنصات من الزجاج المعاد تشكيله حرارياً فيفضل استخدام أسلوب تشكيل للنموذج باعتباره تشكيل نحتي مجسم ‡ .

* يمكن استخدام الجص في عمليات التشكيل بالإضافة عن طريق التشكيل المباشر باستخدام خليط الجبس مع الماء .
† النماذج النحتية المسطحة هي النماذج ذات التشكيل البارز والغائر ، والتي يعتمد القالب الحراري الناتج منها على تشكيل سطح وجوانب العنصر المعماري ، ويترك ظهر العنصر مستوياً بانصهار الزجاج إلى درجة اللزوجة المناسبة .
‡ النماذج النحتية المجسمة هي نماذج ثلاثية الأبعاد يعتمد القالب الحراري الناتج منها على تشكيل جميع أجزاء العنصر المعماري .

ثانياً : أسس تنفيذ قوالب التشكيل الحرارية (الخامات وتأثيرها – أساليب التشكيل) :

تعد القوالب أحد العناصر الهامة في إعادة التشكيل الحراري للزجاج ، وهي تنقسم إلى عدة أنواع منها : القوالب الدائمة (القوالب المعدنية) ، القوالب الشبه دائمة (قوالب الطينات الحرارية والفيبر سيراميك) ، القوالب الهالكة (القوالب الحرارية) .

ويتناول هذا البحث دراسة القوالب الحرارية التي يمكن استخدامها في تشكيل التكسيات الجدارية والعناصر المعمارية النحتية بالمساجد ، ويتم تنفيذ هذه القوالب باستخدام مجموعة من المواد للحصول على خليط سائل يتم صبه عادة * فوق نموذج ويترك ليتصلب ، ثم يستخدم في إنتاج الزجاج بإعادة التشكيل الحراري ، ويجب أن يكون لقالب التشكيل الحراري عدة خواص منها : (م ١٠ ، ص ٦٢)

- سهولة التشكيل والاستخدام .
- يكون للمخلوط الحراري القدرة على التطابق مع النموذج ليأخذ كافة تفصيلاته .
- يكون له درجة من الصلابة ليحافظ على شكله لأطول فترة ممكنة أثناء مراحل التشكيل والتجفيف والتسخين والتبريد .
- لا ينكمش أو يلتوي أو يتلف عند التعرض لدرجات حرارة مرتفعة .
- له معامل تمدد حراري مقارب للتمدد الحراري للزجاج .
- أن تكون الخامات المستخدمة آمنة صحياً تماماً أثناء استخدامها أو حفظها في بيئة العمل .
- يسهل إزالته من الزجاج بدون التصاق بسطحه بعد التشكيل .
- يكون له تكلفة منخفضة .

وتتنوع **الخامات** التي تدخل في تنفيذ القوالب الحرارية ، ويعتمد اختيار خامات القوالب على : (م ٥ ، ص ٢١-٢٢)

- نوع وهيئة الزجاج المستخدم .
- معدل درجات الحرارة أثناء مراحل التشكيل الحراري والتبريد .
- درجة الحرارة القصوى .
- شكل وحجم النحت الزجاجي المطلوب .

ويتأثر أداء قالب التشكيل الحراري بكثافته ومساميته وسمكه ، فزيادة كثافة القالب تقلل من مساميته ، وبالتالي تقلل من إمكانية خروج الماء من القالب بشكل كامل أثناء مراحل التجفيف ليخرج بعد ذلك أثناء التشكيل الحراري النهائي ، بما يؤثر خروجه على الحراريات وعناصر التسخين بالفرن ، وأيضاً يزيد من فرصة حدوث شروخ في القالب الحراري ، كما أن القالب ذو الكثافة العالية يكون له وزن كبير يؤثر على القالب قبل وأثناء وبعد التشكيل الحراري ، ويكون له أيضاً سرعة بطيئة في التسخين والتبريد ؛ بما يتطلب وقتاً كبيراً لتشكيل الزجاج وبالتالي طاقة مستهلكة أكبر .

أما سمك جدار القالب فهو مؤثر رئيسي في عمليات الإنتاج بالقالب الحراري ، ففي حالة القوالب ذات الجدران السميكة ستقل سرعة الانتقال الحراري إلى داخل القالب – خاصة في حالة القوالب المغلقة – وبالتالي قد تؤدي إلى عدم اكتمال صهر الزجاج ، أو استخدام طاقة أكبر للتأكد من استكمال الصهر ، أما القوالب الحرارية ذات الجدران الرقيقة فتعمل على إضعاف قدرة القالب على تحمل درجات الحرارة العالية ، وقد تؤدي إلى انهياره .

ويمكن تقسيم الخامات التي تدخل في تركيب مخلوط القالب الحراري – إضافة إلى الماء – إلى ثلاثة أنواع هي :

- خامات رابطة Binders .
- خامات من مواد حرارية Refractories .
- خامات معدلة Modifiers .

* قد يتم تشكيل القالب الحراري بالنحت المباشر في كتلة حرارية سبق تنفيذها .

- خامات رابطة Binders :

وهي الخامات التي تساعد على ربط جزيئات القالب الحراري معاً أثناء تنفيذ القالب أو استخدامه للتشكيل الحراري ، وتتنوع خواص هذه الخامات ودرجات الحرارة التي تستطيع تحملها قبل الكسر ، ومن هذه الخامات ما يلي : (م ٨ ، ص ٤٥)

Gypsum plaster – Hydroperm – Hydrocal cement – Portland cement – Calcium alumina cement (Fondu) – Colloidal alumina – Colloidal silica – Clay (Fire clay).

وتختلف درجة صلابة هذه الخامات في درجات الحرارة العالية اللازمة لتشكيل الزجاج ، طبقاً للخليط الخاص مع الخامات الحرارية Refractories والخامات المعدلة Modifiers المستخدمة ؛ حيث تترابط جزيئات الخليط معاً بثلاثة طرق مختلفة هي : (م ٨ ، ص ٤٥)

- الرابطة الهيدروليكية (المائية) .
- التجاذب الجزيئي .
- الرابطة السيراميكية .

ويعد الجص Plaster بأنواعه هو العنصر الرئيس في الاستخدام كمادة رابطة للقوالب الحرارية نظراً لانخفاض سعره وتوافره ، إضافة إلى خواصه الجيدة أثناء مراحل تشكيل القالب ، وأثناء استخدامه للتشكيل الحراري للزجاج ، ومعظم أنواع الجص تفقد قوتها في درجات حرارة ما بين (٧٠٠ – ٨٤٠ ْس) ، كما تختلف نسبة الجص في القوالب الحرارية حيث تبلغ من ٢٥ – ٧٥ % من نسبة الخامات المكونة لمسحوق الخامات المخلوطة معاً قبل إضافة الماء (م ٥ ، ص ٢٥)، وقد يضاف إليه نسبة من الخامات الرابطة الأخرى لزيادة صلابة القالب في درجات الحرارة العالية ، فيمكن إضافة ١٥ % من مادة Calcium alumina cement لذلك الغرض خاصة في القوالب المفتوحة التي لا يوجد بها تشكيلات نحتية عميقة Under cuts .

والقوالب الحرارية التي تحتوي على نسبة من الجص تعتبر من نوعية القوالب التي تستخدم لمرة واحدة ، كما يسهل تفتيتها عن الزجاج بعد التشكيل ، حيث يسهل فصلها عنه . (م ٧ ، ص ٩٣)

- خامات من مواد حرارية Refractories :

وهي الخامات التي تقاوم درجات الحرارة العالية بدون حدوث تغيرات كيميائية في تركيبها ، وهي على ذلك تقاوم فعل درجات الحرارة التي يتعرض لها القالب أثناء التشكيل الحراري ، ويعتمد اختيار نوعية الخامة ونسبتها في القالب على الخواص المطلوب توافرها في القالب الحراري ؛ حيث أن الخامات الحرارية لها قدرة متنوعة على مقاومة التآكل بفعل الزجاج الساخن والالتصاق بالزجاج ، ويرجع مقاومة المواد الحرارية للالتصاق بالزجاج إلى :

- التركيب الكيميائي لهذه المواد .
- الحجم الجزيئي للحبيبات .
- نوع الروابط التي تتحد بها مع العناصر الأخرى بالقالب . (م ٨ ، ص ٤٩)

وتضاف المواد الحرارية إلى تركيب القوالب بنسبة من ٥٠ – ٧٥ % ، حيث تقاوم حرارة تشكيل الزجاج والتي تتراوح درجات حرارتها ما بين (٧٨٠ – ٩٥٠ ْس) (م ٥ ، ص ٢٧) ، ومن أهم الخامات الحرارية المستخدمة ما يلي :

- **السليكا** SiO_2Silica : وهي من أكثر الخامات الحرارية التي تستخدم في تكوين القوالب ، وتنصهر عند درجة ١٧١٠ ْس ، وتتوافر بحجم حبيبي متنوع (ما بين ٦٠ – ٢٠٠ مش) ، وهي مقسمة إلى ثلاثة أشكال لها نفس التركيب SiO_2 ، ولكن تختلف في الطريقة التي تترابط بها جزيئاتها ، وهذه الأشكال الثلاثة هي : الكوارتز Quartz ، الفلنت Flint ، الكريستوباليت Cristobalite ، ويعد الكوارتز أشهرها على الإطلاق في الاستخدام كخامة حرارية في القوالب ، ويراعى عند استخدامه في ذلك الغرض مراقبة التغيرات التي تحدث عند درجات الحرارة العالية لتشكيل الزجاج ؛ حيث يكون الكوارتز على هيئة بلورية ألفا Alpha مستقرة حتى درجة حرارة ٥٧٣ ْس ، ويتحول بعدها للاستقرار على الهيئة بيتا Beta عند درجات الحرارة من ٥٧٣– ٨٧٠ ْس ، وهذا التغير من الحالة ألفا إلى بيتا يعرف باسم " Quartz Inversion " ، ويؤدي إلى تغير في حجم جزيئات الكوارتز

بالتمدد بنسبة تصل إلى ٢ % أثناء عمليات تسخين القالب ، وعند التبريد عند درجة ٥٧٣ °س تعكس حالة التحول من بيتا إلى ألفا ويحدث انكماش في الحجم الجزيئي للكوارتز ، وهذا التمدد والانكماش يعمل على حدوث شروخ في القالب الحراري أثناء الإنتاج ، ومن ثم يمكن إضافة مواد أخرى لتقلل من أضرار حدوث التمدد والانكماش للكوارتز ، أو وضع منحنى حراري ذو معدل بطئ بالقرب من درجة حرارة ٥٧٣ °س عند التسخين والتبريد لتجنب ظهور شروخ الصدمة الحرارية . (م ٨ ، ص ٤٩)

- **الألومينا** Alumina Al_2O_3 : وهي أحد المواد التي تتحمل درجات الحرارة العالية ؛ حيث تصل درجة انصهارها إلى ٢٠٥٠ °س، ولا تتفاعل مع الزجاج أثناء التشكيل ، وبالتالي فهي لا تلتصق بسطحه عند درجات الحرارة العالية مقارنة بالخامات الحرارية الأخرى وحجم حبيباتها يصل إلى ٣٥٠ مش . (م ٥ ، ص ٢٧-٢٨)
- **زركونيا** Zirconia : وهي من المواد الحرارية الهامة التي تتحمل درجات حرارة عالية ، فتصل درجة انصهارها إلى ١٧٥٠ °س ، كما أنها تقاوم الالتصاق بسطح الزجاج ، وتتوافر بحجم حبيبي متنوع (ما بين ٣٠ – ٢٠٠ مش) . (م ٨ ، ص ٥٠)
- **جروج** Grog : وهو عبارة عن مسحوق مطحون من طينات خزفية متنوعة تم حرقها مسبقاً ، وهو يتوافر بحجم حبيبي متنوع ، ويضاف إلى القوالب الحرارية لتقليل الانكماش ومقاومة الصدمات الحرارية ، كما أنه يزيد من المسامية ، ويساعد على التجفيف المنتظم للقالب ؛ وبالتالي يتم تجنب الالتواء وتكوين الشروخ قبل وأثناء الحريق ، ولكنه قد يلتصق بسطح الزجاج طبقاً لدرجات الحرارة المستخدمة والزمن ونوع الزجاج ، ويمكن استخدام الجروج بنسبة قليلة كمادة معدلة بالقالب الحراري كطبقة خارجية تحيط بالطبقة الداخلية الملامسة للزجاج .
- **Ludo**(luto) : وهو عبارة عن مسحوق مطحون من قوالب حرارية سبق حرقها ، وهو يعمل كمادة حرارية ومعدلة في خلطة القوالب الحرارية ، واستخدام هذا المسحوق مناسب من الناحية الاقتصادية ومن ناحية تحمله لدرجات الحرارة المرتفعة ، وانخفاض إمكانية التصاقه بسطح الزجاج ، ويمكن أن يستخدم بنسب تصل إلى ٥٠ % . (م ٥ ، ص ٢٩)
- **Molochite** : وهو عبارة عن طينة بيضاء دقيقة (China clay) بنسبة عالية من الألومينا ، وهو يعمل كمادة حرارية ومعدلة ويتوافر بأحجام حبيبية مختلفة ، وقد يضاف إلى خليط القالب الحراري بنسبة تصل إلى ٢٠ % ليزيد من صلابة القالب ويحسن من خواص سطحه الملامس للزجاج ، وهو لا يلتصق بسطح الزجاج وينفصل عنه بسهولة بعد الحريق . (م ٥ ، ص ٢٩)
- **Olivine sand** : وهو يصنع من طحن صخور الأولفين الطبيعية $(Mg,Fe)_2\ SiO_2$ ، وهو أحد المواد الهامة التي تتحمل درجات الحرارة ، لذا يستخدم في خلطة القالب الحراري بنسبة تصل إلى ٢٥ – ٥٠ % ليقاوم الشروخ والصدمات الحرارية ، كما أن له معامل تمدد حراري منخفض في درجات الحرارة العالية ، ونتيجة لإمكانية التصاق حبيباته بالزجاج يفضل أن يحتوي السطح الداخلي للقالب على طبقة من الطلاء من خامات أخرى ذات حجم حبيبي أدق . (م ٨ ، ص ٥٠)

- خامات معدلة Modifiers :

وهي مجموعة الخامات التي تدخل في تكوين القالب الحراري بكميات صغيرة تساعد على تغيير السلوك العام للمخلوط الحراري ، وقد تستخدم لتعديل وقت تصلب المخلوط ، أو تعطي تفاصيل أكثر دقة لسطح القالب ، أو تزيد من مساميته ، أو تمتص تمدد وانكماش العناصر الأخرى بالمخلوط الحراري ، أو تقلل من إمكانية التصاق الزجاج بسطح القالب . وهي لا تضاف لتزيد من صلابة القالب بل قد تضعف من ترابطه ، ولكن إضافتها بنسب محددة تحسن كثيراً من الخواص العامة للقالب ، ومن هذه الخامات المعدلة لخواص القوالب الحرارية ما يلي :

- **الكاولين** Kaolin : وهو عبارة عن طينة لها درجة قليلة من اللدونة وقدرة عالية على تحمل الحرارة ، وتضاف إلى مخلوط القالب الحراري بنسبة تتراوح من ٥ – ١٠ % لتعطي مظهر سطح أفضل للزجاج ، كما أنها تسهل من انفصال الزجاج عن القالب دون التصاق ، ويعمل الكاولين أيضاً كمادة رابطة لعناصر القالب ، ولا يفضل إضافته بنسبة أكثر من ١٠ % ؛ حيث قد يؤدي إلى إحداث تبلور لسطح الزجاج .(م ٥ ، ص ٣٠)

- **التلك** Talc : وهي مادة لها قدرة كبيرة على تحمل الحرارة وتكون خامدة حتى درجة حرارة ٨٥٠ ْس ، كما أنها عند الدرجات العالية تصبح أكثر مقاومة للصدمات الحرارية ، ووجودها بالقالب الحراري يعطي إمكانية لتنفيذ زجاج نحتي بتفاصيل دقيقة (م ٥ ، ص ٣١) ، كما يقلل من التصاق الزجاج بالقالب . (م ١١ ، ص ١٥٠)
- **Vermiculite / Perlite** : وهي عبارة عن مواد تدخل في تشكيل الطينات ، وتضاف إلى القوالب الحرارية لتزيد من قدرتها على تحمل الحرارة العالية ، كما تساهم في تقليل الانكماش وتقاوم الصدمات الحرارية ، إلا أن لها قابلية للالتصاق بسطح الزجاج ، لذا يفضل تبطين السطح الداخلي للقالب بمواد عازلة . (م ٥ ، ص ٣١)

ويوضح الجدول رقم (١) بعض الخامات المستخدمة في القوالب الحرارية وأهم خواصها المؤثرة في أداء القالب .

وقد تضاف بعض المواد الأخرى للقوالب الحرارية كمواد معدلة لتعطي بعض الخصائص المنوعة المطلوبة أحياناً ، فيمكن إضافة مواد مكونة لفقاقيع هواء دقيقة (مثل المنظفات أو الصابون السائل) أثناء خلط مكونات مسحوق القالب الحراري مع الماء ؛ حيث تساهم الفقاقيع الدقيقة بالقالب في خفة وزن القالب وزيادة مساميته ، كما أنها تقلل من انكماش القالب وتمنع تكوين الشروخ الدقيقة .

ويجب مراعاة مجموعة من **العوامل** التي قد تؤثر على القالب الحراري منها :

- استخدام الماء الدافئ – حتى ٣٠ ْس - في عملية الخلط يزيد سرعة تصلب المخلوط مقارنة بالماء البارد .
- يمكن تسريع عملية التصلب باستخدام مسحوق Ludo في خلطة القالب ، أو باستخدام ملح الطعام (كلوريد الصوديوم) ، كما يمكن تقليل هذه السرعة بإضافة حامض الستريك أو الصمغ <
- تستخدم ألياف الفيبر جلاس Fiber glass في تنفيذ القالب الحراري حيث يضاف – خاصة في القوالب كبيرة الحجم – إلى الطبقة الخارجية من القالب ليزيد من صلابته وقدرته على تحمل درجات الحرارة .
- تضاف بعض المواد العضوية إلى الخليط مثل نشارة الخشب الناعمة لتسهل من سرعة وانتظام تجفيف القالب ، كما تحترق نشارة الخشب أثناء التشكيل الحراري تاركة فجوات صغيرة تقلل من إمكانية حدوث شروخ وتقاوم التمدد والانكماش . (م ٥ ، ص ٣١-٣٣)

ويعد **حجم حبيبات العناصر** التي تدخل في تركيب مخلوط القوالب الحرارية أحد الأسس الهامة في تنفيذها فتنوع هذا الحجم ما بين الصغير والمتوسط والكبير يساعد على زيادة قوى الشد بين حبيبات العناصر المستخدمة ، وبالتالي تقلل من فرص الانكماش ، ومن ثم تقل إمكانية تكوين الشروخ ، واختلاف الحجم الحبيبي يعمل على توزيع وترابط الحبيبات بشكل منتظم (Packing)(م ٥ ، ص ٢٦) ، ويؤدي إلى مخلوط ذي كثافة عالية وقوة أكبر ، وأفضل حجم حبيبي لخلطة القالب الحراري تتضمن : (٤٠ % حجم حبيبي كبير ، ٣٠ % حجم متوسط ، ٣٠ % حجم صغير) ؛ حيث تكون الحبيبات المتوسطة ربع قطر الحبيبات الكبيرة ، والحبيبات الصغيرة ربع قطر الحبيبات المتوسطة ، ولتحقيق التوزيع المنتظم لعناصر الخلطة يفضل أن تخلط جافة جيداً قبل إضافتها إلى الماء .

جدول (١) بعض الخامات المستخدمة في القوالب الحرارية وأهم خواصها المؤثرة في أداء القالب

اسم المجموعة	بعض أنواع الخامات	أهم الخواص المؤثرة على القوالب الحرارية
خامات رابطة Binders	الجص Plaster	- العنصر الرئيسي في الاستخدام كمادة رابطة للقوالب الحرارية نظراً لانخفاض سعره وتوافره ، إضافة إلى خواصه الجيدة أثناء مراحل تشكيل القالب ، وأثناء استخدامه للتشكيل الحراري للزجاج ، كما يسهل تفتيته عن الزجاج بعد التشكيل ، وتبلغ نسبته في القوالب الحرارية من ٢٥ – ٧٥ % .
خامات من مواد حراريةRefractories	السليكا $SilicaSiO_2$	- هي من أكثر الخامات الحرارية التي تستخدم في تكوين القوالب ، وتنصهر عند درجة ١٧١٠ ْس ، وتتوافر بحجم حبيبي متنوع (ما بين ٦٠ – ٢٠٠ مش) ، وهي مقسمة إلى ثلاثة أشكال هي : الكوارتز Quartz ، الفلنت Flint، الكريستوباليت Cristobalite ، ويعد الكوارتز أشهرها في الاستخدام كخامة حرارية في القوالب .
	الألومينا Alumina Al_2O_3	- هي أحد المواد التي تتحمل درجات الحرارة العالية ؛ حيث تصل درجة انصهارها إلى ٢٠٥٠ ْس، ولا تتفاعل مع الزجاج أثناء التشكيل ، وبالتالي فهي لا تلتصق بسطحه عند درجات الحرارة العالية مقارنة بالخامات الحرارية الأخرى .
	زركونيا Zirconia	- من المواد الحرارية الهامة التي تتحمل درجات حرارة عالية ، فتصل درجة انصهارها إلى ١٧٥٠ ْس ، كما أنها تقاوم الالتصاق بسطح الزجاج ، وتتوافر بحجم حبيبي متنوع .
	جروج Grog	- يتوافر بحجم حبيبي متنوع ، ويضاف إلى القوالب الحرارية لتقليل الانكماش ومقاومة الصدمات الحرارية ، كما أنه يزيد من المسامية ، ويساعد على التجفيف المنتظم للقالب ، ويمكن استخدامه بنسبة قليلة كمادة معدلة بالقالب الحراري كطبقة خارجية .
	Ludo	- يعمل كمادة حرارية ومعدلة في خلطة القوالب الحرارية ، واستخدامه مناسب من الناحية الاقتصادية ومن ناحية تحمله لدرجات الحرارة المرتفعة ، وانخفاض إمكانية التصاقه بسطح الزجاج ، ويستخدم بنسب تصل إلى ٥٠%.
	Molochite	- يعمل كمادة حرارية ومعدلة ويتوافر بأحجام حبيبية مختلفة ، ويضاف إلى خليط القالب الحراري بنسبة تصل إلى ٢٠ % ليزيد من صلابة القالب ويحسن من خواص سطحه الملامس للزجاج ، وهو لا يلتصق بسطح الزجاج وينفصل عنه بسهولة بعد الحريق .
	Olivine sand	- أحد المواد الهامة التي تتحمل درجات الحرارة ، لذا يستخدم في خلطة القالب الحراري بنسبة تصل إلى ٢٥ – ٥٠ % ليقاوم الشروخ والصدمات الحرارية ، كما أن له معامل تمدد حراري منخفض في درجات الحرارة العالية .
خامات معدلةModifiers	الكاولين Kaolin	- يضاف إلى مخلوط القالب الحراري بنسبة تتراوح من ٥ – ١٠ % لتعطي مظهر سطح أفضل للزجاج ، كما أنها تسهل من انفصال الزجاج عن القالب دون التصاق ، ولا يفضل إضافته بنسبة أكثر من ١٠ % ؛ حيث قد يؤدي إلى إحداث تبلور لسطح الزجاج.
	التلك Talc	- مادة لها قدرة كبيرة على تحمل الحرارة وتكون خامدة حتى درجة حرارة ٨٥٠ ْس ، كما أنها عند الدرجات العالية تصبح أكثر مقاومة للصدمات الحرارية ، ووجودها يعطي إمكانية لتنفيذ زجاج نحتي بتفاصيل دقيقة ، كما يقلل من التصاق الزجاج بالقالب .
	Vermiculite / Perlite	- يضاف إلى القوالب الحرارية لتزيد من قدرتها على تحمل الحرارة العالية ، كما تساهم في تقليل الانكماش وتقاوم الصدمات الحرارية ، إلا أن لها قابلية للالتصاق بسطح الزجاج ، لذا يفضل تبطين السطح الداخلي للقالب بمواد عازلة .

أما **أساليب تشكيل القوالب الحرارية** فتتضمن عدة اتجاهات لتنفيذ القالب ؛ إما بالنحت المباشر في كتلة حرارية للوصول إلى النحت الزجاجي المطلوب أو بصب مخلوط حراري فوق نموذج ، ومن ثم إزالته للحصول على القالب الحراري .
ويمكن تنفيذ القالب الحراري من خلال النموذج بعدة أساليب منها :*

١. تشكيل نموذج طيني ، ثم يصب فوقه القالب الحراري .
٢. تشكيل نموذج طيني ، ثم نموذج جصي ، يصب فوقه قالب حراري .
٣. تشكيل نموذج جصي ، يصب فوقه قالب حراري .
٤. تشكيل نموذج جصي عكسي (ذو تشكيل غائر مثلاً) ، ثم يشكل عليه نموذج من السليكون أو المطاط ، يصب فوقه قالب حراري .
٥. تشكيل نموذج جصي ، ثم قالب من السليكون أو المطاط ، ثم يشكل فيه نموذج من الشمع ، يصب فوقه قالب حراري .
٦. تشكيل نموذج من الشمع (بشكل مباشر أو غير مباشر) ، يصب فوقه قالب حراري . ويظهر الجدول رقم (٢) رسم توضيحي لقطاعات توضح مراحل تشكيل القالب الحراري بأساليب متنوعة .

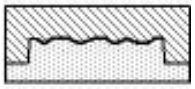
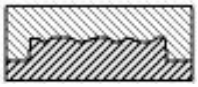
وتمر معظم أساليب تشكيل القوالب الحرارية بعدة مراحل تشمل :

١- **إعداد النموذج لعملية صب المخلوط الحراري :** يتم تجهيز النموذج لعملية الصب لتكوين القالب الحراري ، فيتم عزله (كما في حالة النماذج التي تحتاج لعزل قبل الصب مثل النماذج الجصية) ، أو يعد للصب المباشر (كما في حالة النماذج التي لا تحتاج إلى العزل مثل نماذج الطين أو الشمع) ، ويراعى وضع أجزاء رفيعة من المعدن أو الشمع حول النموذج ؛ يتم إزالتها بعد ذلك لتكون فتحات تهوية تسمح بخروج الهواء من القالب أثناء انصهار الزجاج عند التشكيل الحراري (م ٧ ، ص ٩٥)،(م ١١ ، ص ١٠٠)، وقد يتم عمل فتحات التهوية بالإزالة بالثقب بعد صب القالب الحراري ، ويتم توزيع هذه الفتحات عادة بطريقة منتظمة دقيقة داخل القالب وفي أماكن محددة تسمح بسهولة خروج الهواء و بدون ترك أثر في الزجاج .وتتم عملية الصب بعد وضع حواجز حول النموذج من البلاستيك أو الخشب أو الزجاج أو المعدن بعد عزلها ، مع مراعاة توزيع سمك القالب حول النموذج بشكل يضمن انتظام تجفيف القالب ، وانتظام انتقال الحرارة من وإلى القالب أثناء التشكيل الحراري ، وبالتالي تزيد من فرص تحمله للحرارة دون حدوث شروخ .

٢- **إعداد المخلوط الحراري :** وفيه يتم خلط مكونات القالب الحراري جيداً في حالتها الجافة لضمان تجانس تلك المكونات ، مع مراعاة عوامل السلامة والصحة المهنية من تصاعد غبار مكونات الخليط ، ويتم إضافة المخلوط إلى الماء بالتتابع – مع الحرص على عدم السماح للهواء بالدخول إلى المخلوط – وحتى تمام تشربه بالماء ، ثم التقليب باتجاه دوراني (إما يدوياً أو باستخدام أدوات أو خلاط طبقاً لحجم القالب) حتى الوصول إلى اللزوجة المناسبة للصب ليأخذ المخلوط كافة التفاصيل الموجودة بالنموذج . ونسبة الماء إلى الجص تكون عادة أحد الأسباب الرئيسية في قوة المخلوط الناتج ، وتختلف هذه النسبة باختلاف نوع الجص ودرجة الحرارة ، كما تعد المواد المضافة إلى المخلوط أحد المؤثرات الرئيسية في تحديد تلك النسبة ، فبعض المواد المضافة مثل السليكا لا تمتص الماء ، بينما مواد أخرى مثل نشارة الخشب الناعمة تمتص الماء ، وبالتالي يجب تعويض هذه النسبة الممتصة بزيادة نسبة الماء . وزيادة نسبة مخلوط (جبس / سليكا) إلى الماء تزيد من صلابة القالب الحراري بينما تنخفض قوة القالب بزيادة نسبة الماء ويصبح سهل الكسر (م ١٠ ، ص ٨٣)، وعادة تكون نسبة الماء إلى الخلطة الحرارية أقل بنسبة تصل إلى ٢٠ % عن خلط الجبس مع الماء فقط . (م ١١ ، ص ١٥١)

*في هذا البحث تم اختيار عدة أساليب متنوعة لتنفيذ القالب الحراري بالاعتماد على خامات محددة يتم من خلالها تشكيل النموذج وهي : الطين ، الجص ، الشمع .

جدول (٢) مراحل تشكيل القالب الحراري بأساليب متنوعة

أسلوب تشكيل القالب	مراحل التشكيل				
	أ	ب	ج	د	هـ
١				-	-
٢					-
٣				-	-
٤					-
٥					
٦				-	-
نـــوع الخامات	طين	جبس	قالب حراري	سليكون أو مطاط	شمع

٣- **إعداد المخلوط الحراري :** وفيه يتم خلط مكونات القالب الحراري جيداً في حالتها الجافة لضمان تجانس تلك المكونات ، مع مراعاة عوامل السلامة والصحة المهنية من تصاعد غبار مكونات الخليط ، ويتم إضافة المخلوط إلى الماء بالتتابع – مع الحرص على عدم السماح للهواء بالدخول إلى المخلوط – وحتى تمام تشربه بالماء ، ثم التقليب باتجاه دوراني (إما يدوياً أو باستخدام أدوات أو خلاط طبقاً لحجم القالب) حتى الوصول إلى اللزوجة المناسبة للصب ليأخذ المخلوط كافة التفاصيل الموجودة بالنموذج . ونسبة الماء إلى الجص تكون عادة أحد الأسباب الرئيسية في قوة المخلوط الناتج ، وتختلف هذه النسبة باختلاف نوع الجص ودرجة الحرارة ، كما تعد المواد المضافة إلى المخلوط أحد المؤثرات الرئيسية في تحديد تلك النسبة ، فبعض المواد المضافة مثل السليكا لا تمتص الماء ، بينما مواد أخرى مثل نشارة الخشب الناعمة تمتص الماء ، وبالتالي يجب تعويض هذه النسبة الممتصة بزيادة نسبة الماء . وزيادة نسبة مخلوط (جبس / سليكا) إلى الماء تزيد من صلابة القالب الحراري بينما تنخفض قوة القالب بزيادة نسبة الماء ويصبح سهل الكسر (م ١٠ ، ص ٨٣)، وعادة تكون نسبة الماء إلى الخلطة الحرارية أقل بنسبة تصل إلى ٢٠ % عن خلط الجبس مع الماء فقط . (م ١١ ، ص ١٥١)

٤- **صب المخلوط الحراري وجفافه :** يتم صب المخلوط الحراري بحرص فوق النموذج لضمان أن يأخذ المخلوط كافة التفاصيل النحتية والملامس الموجودة بالنموذج ، ويراعى عدم السماح بدخول الهواء إلى المخلوط أثناء الصب بوضع سطح مائل يسمح بانزلاق المخلوط بلطف فوق النموذج ، ويمكن تقوية القالب الحراري بوضع طبقة من الشبك المعدني أو الفيبر جلاس بعد صب طبقة أولى فوق النموذج ، ومن ثم توضع المادة المدعمة للقالب ويليها طبقة أخرى من المخلوط الحراري ، والذي قد يضاف إليه مواد أخرى تساعد على تقوية الطبقة الخارجية من القالب مثل الجروج .

٥- **إزالة النموذج وتشطيب القالب :** ويتم في هذه المرحلة إزالة النموذج من القالب ؛ إما بفصل النموذج عن القالب كما في النماذج الجصية والطينية ، أو بصهر النموذج باستخدام حمام مائي أو بخار ماء ساخن ، كما في حالة استخدام النماذج الشمعية ، وبعدها يتم التأكد من عدم وجود أية بقايا من خامة النموذج داخل القالب .

٦- **تجفيف القالب الحراري :** تتم عملية تجفيف القالب الحراري للتخلص من الماء قبل البدء في استخدام القالب لتشكيل الزجاج ، وتتم هذه العملية إما بترك القالب لفترة زمنية طويلة وفي درجة حرارة مرتفعة نسبياً ورطوبة منخفضة للتخلص من الماء بصورة طبيعية ، أو قد تتم عملية التجفيف باستخدام أفران خاصة تؤدي نفس الغرض ولكن في زمن أقل ؛ حيث يتم تسخين القالب في درجة حرارة لا تتجاوز ١٠٠ °س ، ويجب أن يتم التجفيف بشكل بطئ منتظم يسمح بجفاف جميع أجزاء القالب وسطحه الداخلي والخارجي معاً ، وذلك لتجنب حدوث التواء أو ضغوط أو إضعاف لبنية القالب ومنع حدوث شروخ به ، ويختلف زمن التجفيف أيضاً باختلاف حجم القالب وسمكه . ويتم عادة إجراء حرق أولي للقالب بعد التجفيف بهدف التخلص من كل روابط الماء الموجودة بالقالب ؛ حيث يفضل أن يتضمن المنحنى الحراري المستخدم ارتفاع تدريجي بطئ في المرحلة الأولى (حتى٢٠٠ - ٣٠٠ °س) لضمان خروج بقايا الماء دون حدوث شروخ دقيقة بالقالب ، وقد تتم عملية الحرق الأولي للقالب في مرحلة منفصلة بعد التجفيف وقبل التشكيل النهائي للزجاج ، ولكن يراعى الحرص الشديد في التعامل مع القالب حيث يصبح ضعيفاً بعد تلك العملية .

ثالثاً : أسس التشكيل الحراري (المنحنى الحراري – الأساليب):

يتم تجهيز الزجاج المستخدم للتشكيل ، وتختلف نوعية الزجاج التي يمكن استخدامها في أسلوبي التشكيل بالصهر Casting ، Pâte de verre ، فيتم عادة استخدام زجاج تركيبه (سليكا – صودا – جير) ، كما قد يتم استخدام زجاج الكريستال أو زجاج البوروسليكات ، وتحديد نوعية الزجاج المستخدم أحد الأساسيات الهامة في عمليات التشكيل الحراري ؛ حيث يُبنى عليها المنحنى الحراري المناسب للتشكيل ، كما أن التركيب الكيميائي للزجاج يشكل عنصراً أساسياً في خواصه الطبيعية وبالتالي خواصه الحرارية والتي لها درجة كبيرة من الأهمية عند استخدام نوعيات مختلفة من الزجاج ، والتي يستتبعها ضرورة التأكد من استخدام نوعيات متوافقة من الزجاج لتلافي حدوث إجهادات كبيرة – ناتجة عن اختلاف معاملات التمدد الحراري - قد تؤدي إلى كسر الزجاج .

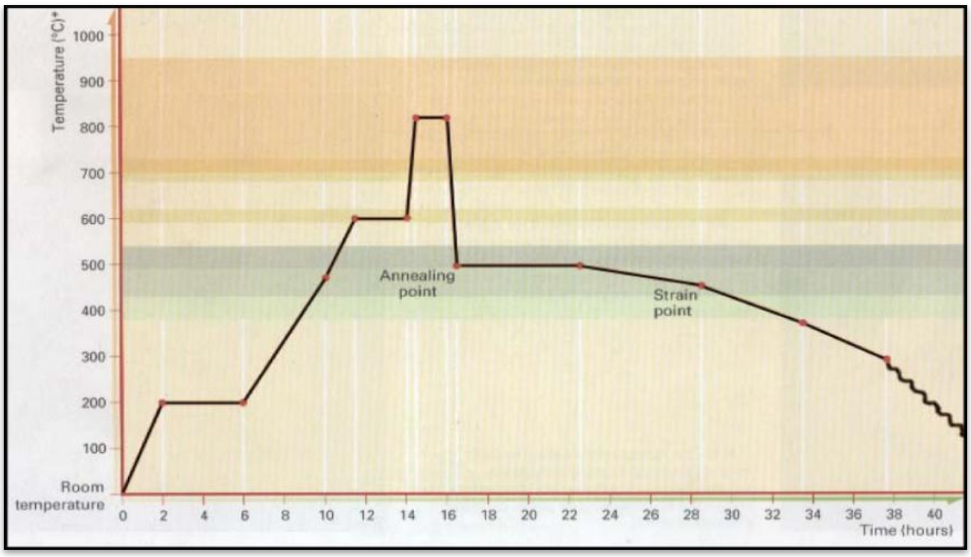
ويحدد مظهر سطح العمل النحتي الزجاجي وأسلوب الإنتاج المستخدم نوعية الزجاج من حيث : الشفافية (شفاف – نصف شفاف – معتم) ، اللون (ملون – عديم اللون) ، الهيئة (مسطحات زجاجية – كتل – قطع غيرة – حبيبات) ، ويتحدد وزن الزجاج المستخدم بالاستعانة بحجم النموذج وفي إطار تحديد كثافة الزجاج ، ويتم ذلك بعدة طرق تعتمد على استخدام الماء كدليل على حساب حجم النموذج * وبالتالي حجم الزجاج ، وعليه يتم تحديد وزن الزجاج المستخدم .
وتختلف درجة الحرارة المستخدمة للتشكيل في كلا الأسلوبين Casting ، Pâte de verre ، حيث تبلغ من (٥٧٣ – ٨٧٠ °س) (م١٢، ص١٠٤) ، ويتم تحديد درجة حرارة التشكيل والمنحنى الحراري طبقاً لعدة عوامل منها :

*يتم ذلك إما بغمر النموذج داخل حوض معلوم السعة به ماء ، ويتم تحديد حجم النموذج طبقاً لحساب قدر الإزاحة التي أحدثها غمر النموذج بالماء ، كما قد يتم تحديد الحجم بصب الماء داخل فراغ القالب الحراري بعد إزالة النموذج (مع مراعاة إمكانية امتصاص القالب لبعض الماء ، ولذا يفضل استخدام تلك الطريقة بعد تشكيل القالب مباشرة وقبل جفافه) ، ثم يفرغ القالب ويحسب حجم الماء ، كما قد يتم حساب الحجم بطرق رياضية طبقاً لشكل النموذج .

- أسلوب الإنتاج المستخدم : (Casting ، Pâte de verre) .
- حجم وأبعاد وسمك العمل : (صغير – متوسط – كبير) .
- نوع القالب المستخدم : (قوالب مفتوحة – قوالب مغلقة) .
- السلوك الحراري للقالب : (معدل الانتقال الحراري – مقاومة درجات الحرارة) .
- سمك جدار القالب : (صغير – متوسط – كبير) .
- نوع الزجاج المستخدم وخواصه : (سليكا ، صودا ، جير - كريستال - بوروسليكات) .
- هيئة الزجاج : (مسطحات – كتل – حبيبات متنوعة الحجم) .
- التأثير المطلوب في مظهر العمل : (تأثير الصهر الكامل للزجاج – تأثير ملمسي واضح للحبيبات أو القطع الزجاجية) .

وهناك العديد من المنحنيات الحرارية التي تستخدم لهذا الغرض بداية من التسخين من درجة حرارة الغرفة حتى التشكيل الحراري ثم التبريد ، والشكل رقم (١) (م ١٢ ، ص ١٠٤) يظهر أحد تلك المنحنيات التي تتضمن المراحل المختلفة للتشكيل وهي :

١- التسخين البطئ حتى ٢٠٠ ْس .
٢- التثبيت عند ٢٠٠ ْس لضمان خروج الرطوبة من جسم القالب .
٣- التسخين حتى درجة حرارة ما بين درجة التبريد ودرجة الإجهاد (طبقاً لنوع الزجاج المستخدم) .
٤- التسخين البطئ حتى درجة حرارة ٥٧٣ ْس .
٥- التثبيت عند تلك الدرجة لضمان انتظام توزيع الحرارة داخل وخارج القالب والزجاج ، إضافة إلى المحافظة على عدم تكون شروخ كبيرة بجسم القالب نتيجة لتحول الكوارتز من الحالة ألفا إلى الحالة بيتا وحدوث تمدد في حجم القالب الحراري .
٦- رفع درجة الحرارة سريعاً حتى الدرجة القصوى للتشكيل .
٧- تثبيت الحرارة عند تلك المرحلة لضمان انتظام توزيعها .
٨- خفض سريع لدرجة الحرارة حتى ٥٦٠ ْس لضمان عدم تبلور سطح الزجاج .
٩- التثبيت عند درجة حرارة التبريد .
١٠- خفض درجة الحرارة ببطء حتى درجة الإجهاد .
١١- التبريد حتى درجة حرارة الغرفة .



شكل (١) أحد المنحنيات الحرارية التي تتضمن المراحل المختلفة للتشكيل بالصهر

وتعتبر عملية التبريد من أدق مراحل تشكيل النحت الزجاجي ؛ حيث يعتمد منحنى التبريد عادة على سمك ونوعية الزجاج وخواصه ، ويظهر الجدول رقم (٣) (م ١٠ ، ص ٥١) أحد جداول التبريد المستخدمة لتبريد نحت زجاجي متعدد السمك من خلال التبريد بداية من درجة التبريد ٥١٦ °س حتى درجة حرارة الغرفة مروراً بثلاث مراحل للتبريد بثلاث معدلات مختلفة للانتقال الحراري .

جدول (٣) أحد جداول التبريد المستخدمة لتبريد نحت زجاجي متعدد السمك

سمك الزجاج (مم)	زمن التثبيت (عند٥١٦°س) (بالساعة)	المرحلة الأولى		المرحلة الثانية		المرحلة الثالثة		الزمن الكلي (بالساعة)
		معدل التبريد (°س/ساعة)	درجة الحرارة (°س)	معدل التبريد (°س/ساعة)	درجة الحرارة (°س)	معدل التبريد (°س/ساعة)	درجة الحرارة (°س)	
١٢ مم	٢	٥٥	٥١٦-٤٢٧	٩٩	٤٢٧-٣٧١	٣٣٠	٣٧١-٢١	٦
١٩ مم	٣	٢٥	٥١٦-٤٢٧	٤٥	٤٢٧-٣٧١	١٥٠	٣٧١-٢١	١٠
٢٥ مم	٤	١٥	٥١٦-٤٢٧	٢٧	٤٢٧-٣٧١	٩٠	٣٧١-٢١	١٦
٣٨ مم	٦	٦.٧	٥١٦-٤٢٧	١٢	٤٢٧-٣٧١	٤٠	٣٧١-٢١	٣٣
٥٠ مم	٨	٣.٨	٥١٦-٤٢٧	٦.٨	٤٢٧-٣٧١	٢٢	٣٧١-٢١	٥٦

رابعاً : أسس التشطيب والتركيب (الخامات والأساليب) :

بعد الانتهاء من عملية التشكيل الحراري للزجاج داخل القالب ؛ يتم إخراج الزجاج من القالب إما بشكل مباشر دون الحاجة إلى تفتيت القالب – طبقاً لهيئة وتفاصيل التشكيل النحتي – أو تفتيت القالب للحصول على الزجاج ، وذلك في حالة التشكيل في القوالب المغلقة أو التي تحتوي على تشكيلات بارزة وغائرة عميقة Under cuts .

ويتم تعريض النحت الزجاجي الناتج لعمليات تشطيب متنوعة تختلف باختلاف حالة الزجاج ، ويمكن تصنيف تلك العمليات إلى عدة اتجاهات تضم :

- تشطيب بسيط : ويتم فيه إزالة أي بقايا من جسم القالب ملتصقة بسطح الزجاج ، وذلك باستخدام فرشاة خشنة .
- تشطيب لإزالة الأجزاء الزائدة من الزجاج : ويتم فيه التخلص من أية أجزاء زائدة من الزجاج ؛ إما باستخدام أدوات يدوية مثل الأحجار اليدوية التي تحتوي على حبيبات من مواد صلبة (مثل كربيد السليكون) تعمل على شطف الزجاج وإزالة الأجزاء الزائدة منه أو باستخدام ماكينات الشطف أو منشار التقطيع .
- تشطيب لإزالة الخطوط البارزة على سطح الزجاج : وهي الخطوط التي قد تظهر نتيجة لدخول الزجاج في الشروخ الدقيقة التي قد تتكون بالقالب أثناء التشكيل الحراري ، ويتم إزالة تلك الخطوط باستخدام أحجار يدوية مع الماء ، أو باستخدام أجهزة دقيقة للخدش والحفر على سطح الزجاج .
- تشطيب عن طريق تلميع سطح الزجاج : ويتم ذلك بطرق يدوية ، أو باستخدام ماكينات خاصة باستخدام الماء مع أكاسيد التلميع (مثل أكسيد السيريوم) .

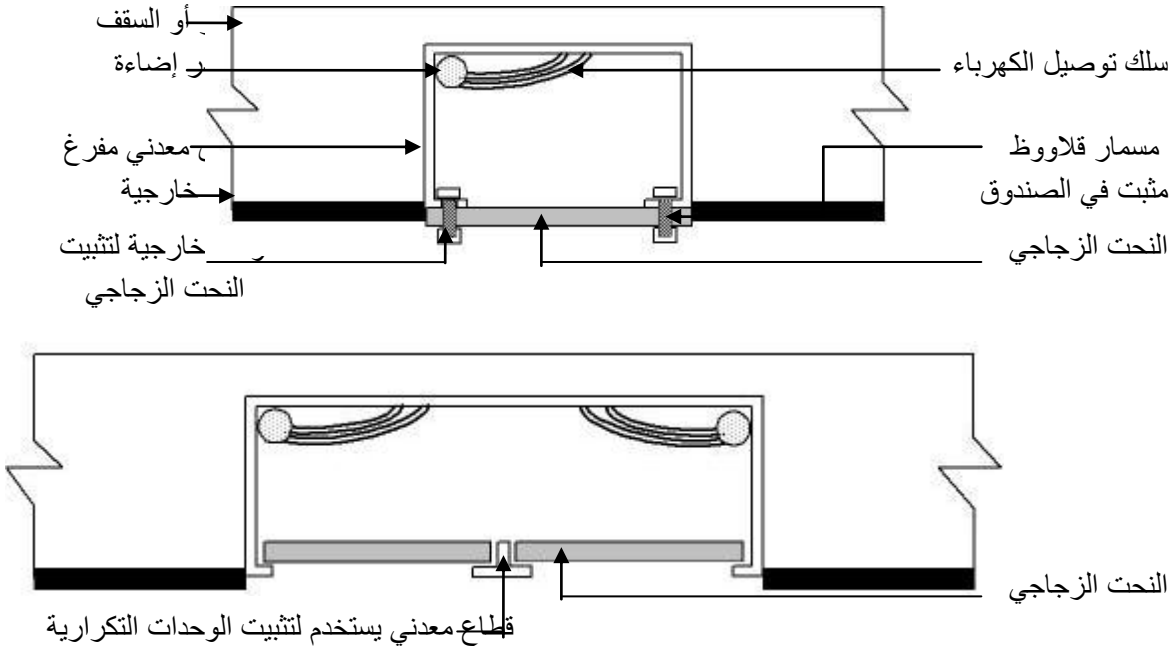
كما قد تتم عملية التشطيب بجميع الأساليب السابقة معاً طبقاً لحالة الزجاج ومظهر السطح المطلوب – جمالياً ووظيفياً –من حيث إظهار الشفافية واللون والملمس ودرجة اللمعان ، ويتم ذلك إما بطرق ميكانيكية أو كيميائية .

ولإمكانية تركيب النحت الزجاجي كبلاطات نحتية أو أشرطة زخرفية في العناصر المعمارية بالمساجد أو كعناصر معمارية إضافية يتم تجهيز هذه النحتيات لعمليات التثبيت والتركيب ، وتتضمن تلك العملية عدة مراحل طبقا لشكل العمل النحتي وحجمه وتجهيزات التركيب الملائمة ، ويجب أن يتم تثبيت النحت الزجاج بحيث يكون قابلاً للفك والتركيب بسهولة تمكن من عمليات إحلال وتبديل الإضاءة الداخلية ، ويمكن أن يتم تثبيت النحتيات الزجاجية المسطحة بعدة أساليب منها :

- يتم تثقيب النحت الزجاجي بغرض تركيبه – بواسطة مسامير - في شاسيه معدني مثبت داخل الجدران وبه وحدات للإضاءة الداخلية .

- تثبيت النحت الزجاجي داخل إطار معدني أو خشبي يوجد خلفه الإضاءة الداخلية ويسهل فكه وتركيبه .
- تثبيت النحتيات الزجاجية المتكررة بأحد الأساليب السابقة مع مراعاة اختلاف مظهر سطح العمل في كل أسلوب وتأثيره على إظهار القيم الجمالية المطلوبة .

أما بالنسبة للنحت الزجاج المجسم الذي يمكن أن يوظف كعناصر معمارية إضافية مثل المقرنصات ، فيتم تثبيته إما كوحدات منفصلة باستخدام مسامير التثبيت أو يثبت كوحدات مجمعة تلصق معاً أو تثبت داخل شاسيه معدني ، ثم تركب ، والشكل رقم (٢) يظهر بعض نماذج التركيب المقترحة .



شكل (٢) قطاعات توضيحية لبعض نماذج تثبيت النحت الزجاجي

٥- دراسة لكيفية استخدام التكسيات الجدارية النحتية الزجاجية تطبيقاً على أحد المساجد المعاصرة :

يعد استخدام النحت الزجاجية في العناصر المعمارية بالمساجد من الأمور الحديثة نسبياً ، حيث يندر المصممون الذين يعملون في مجالات النحت الزجاجي ؛ نظراً لصعوبة التقنية وارتباطها ليس فقط بقيم التعبير الفني للنحت ، ولكن أيضاً ارتباطها بشكل كبير بتكنولوجيا التنفيذ ، فالنحت الزجاجي لا يمكن ممارسته باعتباره فن خالص ؛ بل فن يظهر من خلال علوم تخصصية دقيقة وإمكانات كبيرة في التنفيذ والتجهيز ، ومن هنا فقد حاول هذا البحث وضع مجموعة من الأسس التكنولوجية لتشكيل النحت الزجاجي المنفذ بإعادة التشكيل الحراري .

ولإظهار القيم الجمالية التي يمكن أن يضيفها النحت الزجاجي على العناصر المعمارية بالمساجد ، فقد اتجه البحث إلى اختيار أحد المساجد الحديثة * لتوضيح كيفية توظيف النحت الزجاجي في العناصر المعمارية لهذا المسجد ، وفي ذلك الإطار تم تنفيذ عينات من الزجاج على هيئة بلاطات نحتية مسطحة ذات تشكيلات بارزة وغائرة تعتمد على وحدات تكرارية هندسية ونباتية إسلامية ، وقد تم استخدام تقنيتي الصهر بإعادة التشكيل الحراري (Casting ، Pâte de verre) لتنفيذ هذه العينات ، وتظهر الأشكال من رقم (٣) إلى (٦) مراحل تنفيذ العينات بداية من تشكيل نموذج جصي ، ثم تنفيذ القالب الحراري ، وصولاً إلى التشكيل الحراري للزجاج .

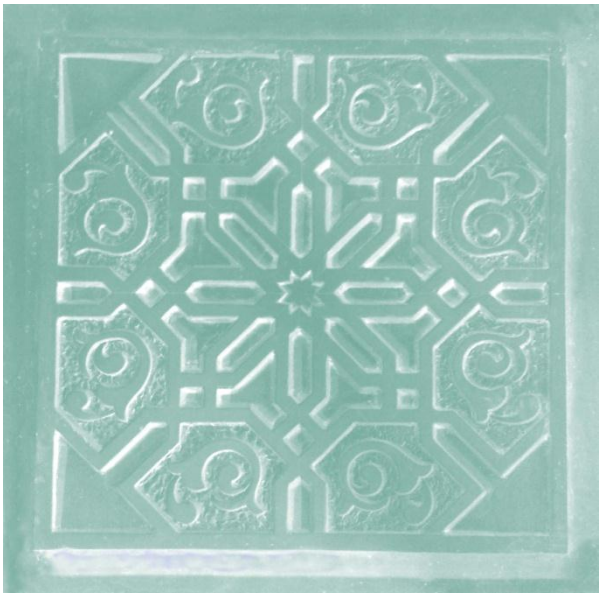
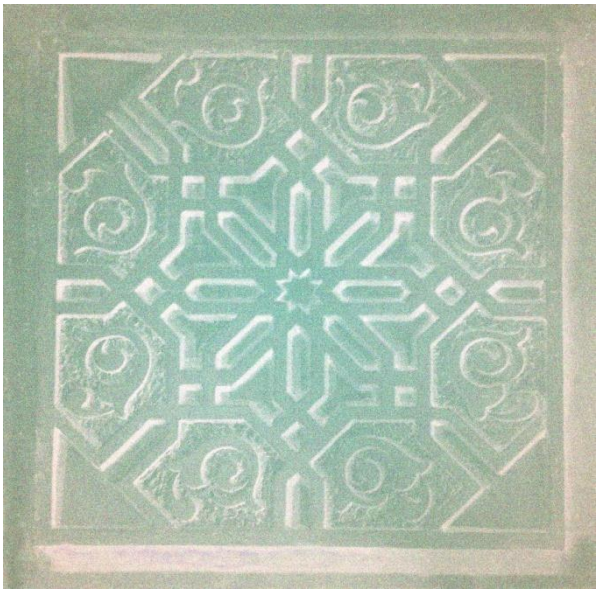
أما الشكلين رقم (٧) ، (٨) فيوضحا بعض العناصر المعمارية التي يقترح أن يوظف فيها النحت الزجاجي بالمسجد المختار .

* تم اختيار مسجد الرحمن الرحيم لذلك الغرض ، وهو أحد المساجد الحديثة بمدينة القاهرة التي بنيت على طراز يحاكي المسجد النبوي بالمدينة ، كما يحتوي المسجد على مجموعة مميزة من العناصر المعمارية بالغة الجمال والدقة .

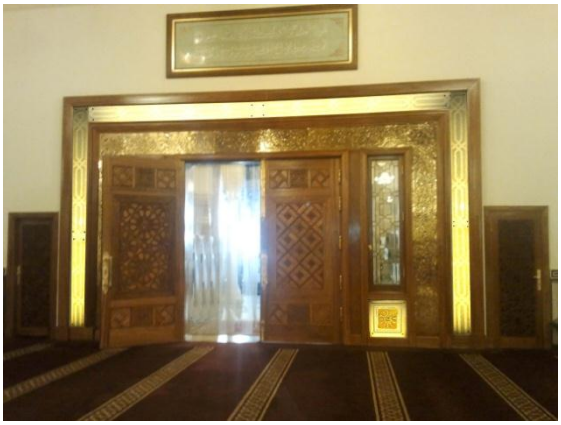
شكل (٣) مراحل تنفيذ النموذج الجصي

شكل (٤) مراحل تنفيذ القالب الحراري

شكل (٥) مراحل إعادة التشكيل الحراري للزجاج

شكل (٦) عينات الزجاج بعد التشكيل الحراري



شكل (٧) مقترح لتوظيف النحت الزجاجي حول إطار الباب الرئيسي للمسجد وفي الحشوات

شكل (٨) مقترح لتوظيف النحت الزجاجي في المقرنصات والحشوات الجدارية والأشرطة الزخرفية والعقود

نتائج البحث :

- من خلال البحث تم التأكيد على إمكانية استخدام النحت الزجاجي المعاد تشكيله حرارياً في التكسيات الجدارية والعناصر المعمارية المختلفة بالمسجد ، في إطار تحقيق متطلبات الأداء الوظيفي وتفعيل القيم الجمالية للزجاج.
- تم وضع مجموعة من الأسس التكنولوجية التي تحكم عمليات تنفيذ النحت الزجاجي المنتج بإعادة التشكيل الحراري بطريقتي (Casting ، Pâte de verre) بداية من تشكيل النموذج حتى تنفيذ القالب الحراري ، وصولاً إلى التشكيل الحراري للزجاج .
- تم استنباط أهم الاعتبارات التكنولوجية المؤثرة في تنفيذ النحت الزجاجي وبصفة خاصة تلك الاعتبارات التي ترتبط بقوالب التشكيل الحرارية من حيث : الخامات المستخدمة (مواد رابطة – حرارية – معدلة) وخواصها المؤثرة في أداء القالب – الأساليب المختلفة لتشكيل القوالب الحرارية من خلال النماذج المختلفة – أهم المراحل لتشكيل القوالب .
- أمكن تنفيذ مجموعة من العينات للنحت الزجاجي بطرق إعادة التشكيل الحراري في إطار تفعيل الأسس التكنولوجية المستنبطة ومراعاة الاعتبارات المؤثرة في عمليات التنفيذ .
- تم عمل دراسة مبسطة لمحاكاة توزيع النحت الزجاجي في العناصر المعمارية لأحد المساجد الحديثة .

توصيات البحث :

- تفعيل القيم الجمالية والوظيفية للنحت الزجاجي في العناصر المعمارية المختلفة لعمارة المساجد .
- استكمال المنظومة البحثية لتطوير فنون الزجاج في العمارة الإسلامية ، بما يلائم التطور العلمي الحديث في الأساليب التكنولوجية المختلفة لصناعات الزجاج .
- التأكيد على توفير الاحتياجات والتجهيزات اللازمة داخل قسم الزجاج بكلية الفنون التطبيقية لوضع منظومة فاعلة للتعليم والتدريب لدراسة تقنيات الزجاج المختلفة .
- إنشاء مركز بحثي متخصص في مجالات تصميم وتكنولوجيا قوالب تشكيل الزجاج في مصر .

المراجع :

١- جوزيف شاخت ، كليفورد بوزروث : **" تراث الإسلام "** الجزء الأول - ترجمة / محمد زهير السمهوري ، حسين مؤنس ، إحسان صدقي العمد – تعليق وتحقيق/ شاكر مصطفى – مراجعة/ فؤاد زكريا – سلسلة عالم المعرفة - العدد ٢٣٣ ؛ الكويت ، ١٩٩٨ .

٢- حسين مؤنس : **" المساجد "** سلسلة عالم المعرفة – العدد ٣٧ ؛ الكويت ، ١٩٨١ .

٣- عفيف بهنسي : **" جمالية الفن العربي "** سلسلة عالم المعرفة – العدد ١٤ ؛ الكويت ، ١٩٧٩ .

٤- يحي وزيري : **" العمارة الإسلامية والبيئة – الروافد التي شكلت التعمير الإسلامي "** سلسلة عالم المعرفة – العدد ٣٠٤ ؛ الكويت ، ٢٠٠٤ .

5- Angela Thwaites : " **Mold Making for Glass** " A & C Black Publishers, London, 2011.

6- Bettina Eberle : " **Creative Glass Techniques – Fusing , Painting , Lampworking** "A & C Black Publishers, London, 1997.

7- Boyce Lundstrom & Daniel Schwoerer: " **Glass Fusing** - Book One" published by Vitreous Publications, Canada, 1987.

8- Boyce Lundstrom : " **Glass Casting and Mold Making** " published by Vitreous Publications, Canada, 1989.

9- Boyce Lundstrom : " **Advanced Fusing Techniques** - Glass Fusing Book Two " published by Vitreous Publications, Canada, 1991.

10- Henery Halem : " **Glass Notes– A Reference for The Glass Artist"** published by Franklin Mills Press, Kent, Ohio, USA, 2006.

11- Keith Cummings : " **Techniques of Kiln-formed Glass "**A & C Black Publishers, London, 2007.

12- Philippa Beveridge , Ignasi Domènech & Eva Pascual : " **Warm Glass – A Complete Guide to Kiln-Forming Techniques – Fusing , Slumping , Casting "** published by LARK BOOKS , New York, 2005.