مقالات غير محكمة, ندوة عمارة المساجد، م ١٠ أ، ص ص ٢٢٩-٢٤١، كلية العمارة والتخطيط، جامعة الملك سعود (١٤١٩ هـ/ ١٩٩٩م)

استخدام وحدات مسبقة الصب في إنشاء القباب:
قبة مسجد صلاح الدين الأيوبي في طولكرم - فلسطين

رياض عبد اللطيف عبد الكريم عوض

كلية الهندسة, جامعة النجاح
نابلس, فلسطين

ملخص البحث: تصف هذه الورقة طريقة حديثة في بناء القباب تم استخدامها عملياً في إنشاء قبة مسجد صلاح الدين الأيوبي في مدينة طولكرم، إحدى مدن الساحل الفلسطيني وقد أثبتت الطريقة فاعليتها. لقد تم استيحاء هذه الفكرة من طرق إنشاء القباب التقليدية التي كانت متوارثة عبر تاريخ العمارة الإسلامية، مع أنه بتطور الخرسانة شاع انتشار طريقة استخدام الخرسانة المسلحة في إنشاء القباب بعد أن يتم تشكيل قوالب من الخشب بشكل القبة المطلوب، إلا أن هذه الطريقة لها عدة سلبيات وهو ما أدى إلى التفكير في استخدام طريقة جديدة تتمثل في استخدام وحدات مسبقة الصب يتم تصنيعها من الخرسانة ثم يتم بناؤها لتشكيل القبة المطلوبة دون الحاجة إلى قالب الخشب. تم التطرق خلال هذا البحث إلى وصف لهذه الطريقة الجديدة بعد استعراض الطرق المختلفة المستخدمة في إنشاء القباب ومقارنة لهذه الطريقة مع باقي الطرق من حيث الميزات والسلبيات.

المقدمة

لقد كانت القباب -وما زالت- معلماً من معالم الحضارة العربية الإسلامية التي عمت أرجاء واسعة من هذه المعمورة. إن فكرة القباب نشأت ابتداءً، في صورة فكرة إنشائية لتغطية مساحات واسعة، فالقبة بوصفها عنصراً إنشائياً تقع تحت تأثير قوى الضغط فقط، والمواد الإنشائية التي كانت مستخدمة تتحمل قوى الضغط أكثر بكثير من تحملها لقوى الشد، ونظراً لشيوع استخدام القبة في العمارة الإسلامية فقد أصبحت معلماً من معالم الحضارة العربية الإسلامية. وقد تطورت طرق إنشاء القباب على مر العصور تبعاً للمواد الإنشائية المتوافرة في كل عصر.

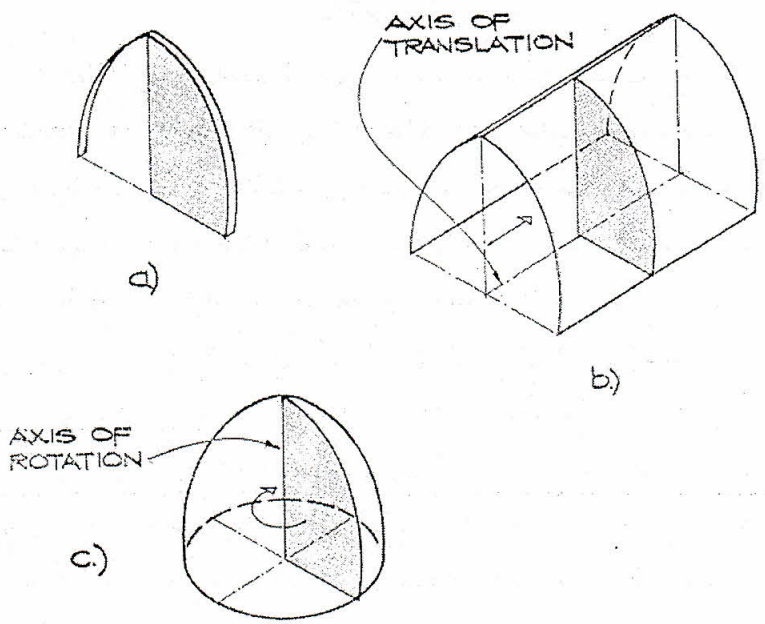
لقد تحكمت خواص مواد البناء المستخدمة في الإنشاء في شكل النظم الإنشائية لكي يتم استثمار خواص هذه المواد على أكمل وجه. فعلى سبيل المثال يستطيع الخشب تحمل قوى الشد والضغط على السواء في الوقت الذي لا تستطيع فيه وحدات الطوب والحجر المترابطة بعضها مع بعض بواسطة مواد إسمنتية أو طينية تَحَمُّل قوى الشد، لكن باستطاعتهما تَحَمُّل قوى الضغط، بالرغم من أن الحجر والطوب يعدان من أكثر أنواع مواد البناء المستخدمة في الإنشاء منذ قرون طويلة نظراً لخواصهما الإنشائية المتميزة ونظراً لقدرتهما على الديمومة وقابليتهما لتشكيل أنماط معمارية متميزة. وقد مكن التطور التكنولوجي من استخدام تقنيات متقدمة تستثمر خواص المادة مثل الانتقال من نظام الخرسانة المسلحة إلى نظام الخرسانة مسبقة الإجهاد، أو التحول إلى استخدام رقائق الخشب المصفحة (laminated timber)، أو غير ذلك من الوسائل.

لقد تميزت العمارة الإسلامية على مر العصور باستخدام نمط إنشائي متميز يمثل حجر الزاوية لهذه العمارة المتميزة، وهذا النمط الإنشائي تمثل في استخدام القوس (arch)، والقبة (dome)، والعقد (vault) بوصفها عناصر أساسية يعتمد عليها هذا النمط، وجميع هذه العناصر تتشكل ابتداءً من شكل نصف قوس (half arch)، كما هو موضح في الشكل رقم (١)، وتتشكل القبة من دوران نصف القوس حول محور رأسي، أما العقد فيتشكل من إزاحة القوس على طول محور أفقي.

إن جميع هذه العناصر تقاوم الأحمال الرأسية أساساً بواسطة مقاومة مواد البناء المستخدمة في هذه العناصر لقوى الضغط لأن إجهادات الشد (tensile stresses) في هذه العناصر تكون محدودة، ويبنى القوس من وحدات متراكبة بحيث تكون خطوط التقائها (joints) متعامدة مع خط القوس.

تطور طرق إنشاء العناصر الأساس في العمارة الإسلامية

أدى استخدام هذه الأنماط الإنشائية الثلاثة (القوس، القبة، العقد)، إلى تطوير نماذج معمارية متميزة, امتازت بها العمارة الإسلامية طوال قرون عديدة، وذلك بإدخال تعديلات بسيطة على الشكل الهندسي الأساسي، الذي هو القوس، وقد أصبحت هذه الأنماط الإنشائية معلماً من معالم العمارة الإسلامية التي انتشرت قديماً وحديثاً في طول العالم الإسلامي وعرضه، وأصبحت هذه العمارة تعرف من خلال هذه العناصر التي استخدمت ابتداءً كفكرة إنشائية.

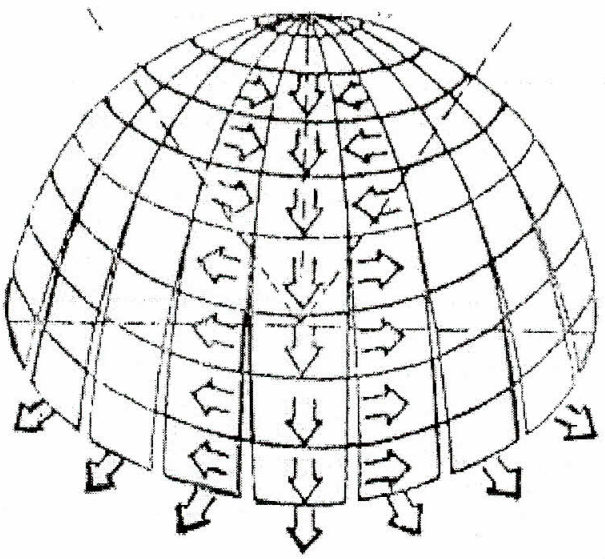


الشكل ١ : الأشكال الهندسية للقوس والقبة والعقد.

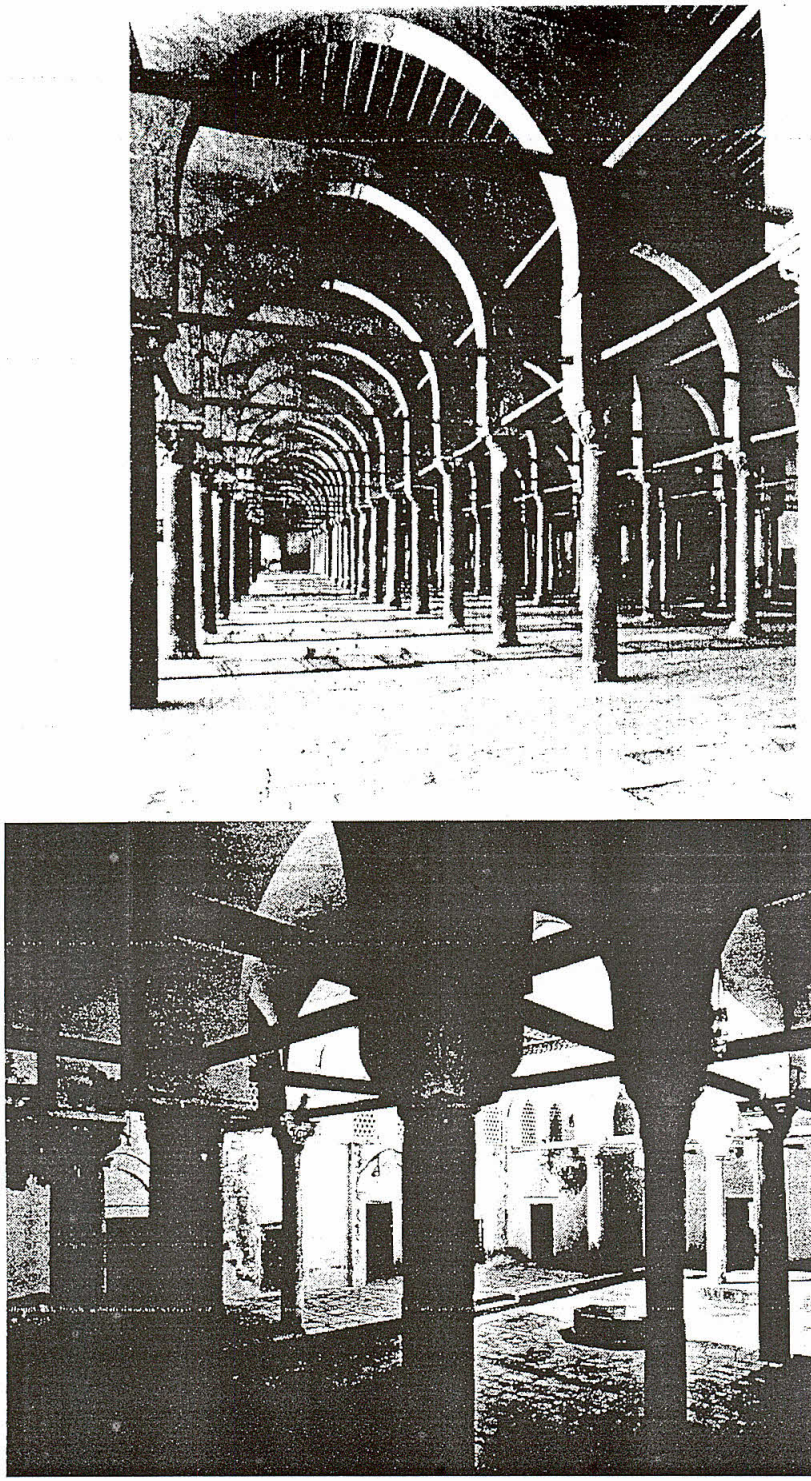
إن الأوزان أو الأحمال الرأسية التي يتعرض لها القوس أو القبة، تؤدي إلى حصول قوى أفقية عند قاعدتي القوس، أو عند قاعدة القبة (قوى جانبية)، كما هو موضح في الشكل رقم (٢)؛ وهذه القوى يمكن مقاومتها بواسطة الأعمدة التي يرتكز عليها القوس، أو بواسطة جسر ربط، يربط قاعدتي القوس (في حالة القوس) بواسطة جسر دائري, يقع على محيط قاعدة القبة (في حالة القبة).

وفي حالة وجود عدد من الأقواس المتجاورة, فإن القوى الأفقية للأقواس الداخلية، يلغي بعضها بعضاً، ويمكن ملاحظة وجود جسور الربط بين الأقواس التي أنشئت في مسجد عمرو بن العاص (٦٧٣م)، والجامع الأزهر (٩٧٠م) في القاهرة، كما يظهر في الشكل رقم (٣). أما الجامع الكبير الذي أنشئ في قرطبة عام (٩٦٨م)، فقد استخدم فيه نمط متميز من الأقواس، هي الأقسام المزدوجة، وذلك لتقليل ارتفاع القوس الواحد، وتقليل مقدار القوة الأفقية التي يمكن أن تنشأ.

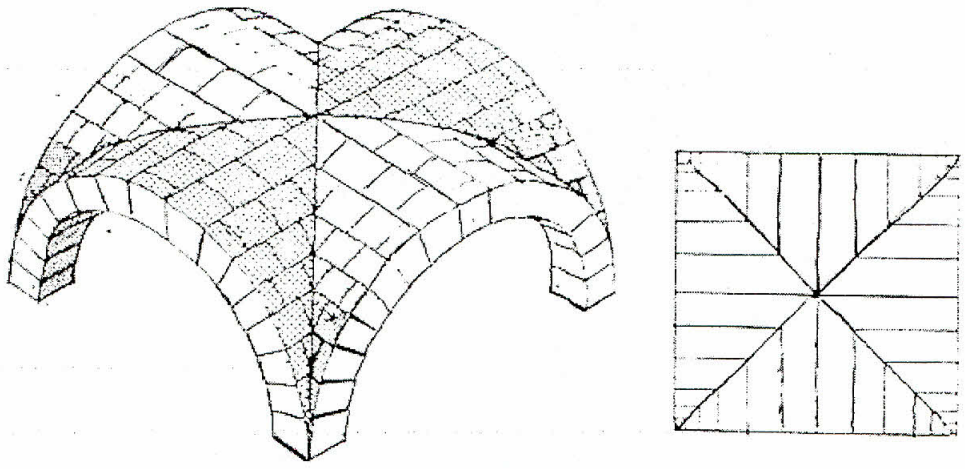
إن العقد (vault) الذي يتشكل من عملية إزاحة القوس على طول محور معين، لا يمكن أن يغطي مسافة عرضية، أو بحور (span) كبيرة، وتبعاً للفكرة الإنشائية لا يمكن فتح نوافذ أو شبابيك على جوانب العقد. من هنا نشأت فكرة استخدام العقد المتعامد (cross vault) الذي يرتكز على أربع دعامات (support)، والذي يتيح تغطية مساحات واسعة، كما يتيح فتح أبواب أو شبابيك في الجهات الأربع، كما هو واضح في الشكل رقم (٤). وهذه الفكرة استخدمت ابتداء في فارس، كما استخدمت في بناء القاعة الرئيسة في قصر عمرة في الأردن عام (٧٥٠م)، وهناك أمثلة عديدة أخرى على استخدام هذا النمط الإنشائي في مواقع مختلفة في العالم الإسلامي.



الشكل رقم٢: القوى الأفقية الناشئة عند قاعدة القبة.



الشكل رقم ٣: جسور الربط بين الأعمدة التي ترتكز عليها الأقواس.

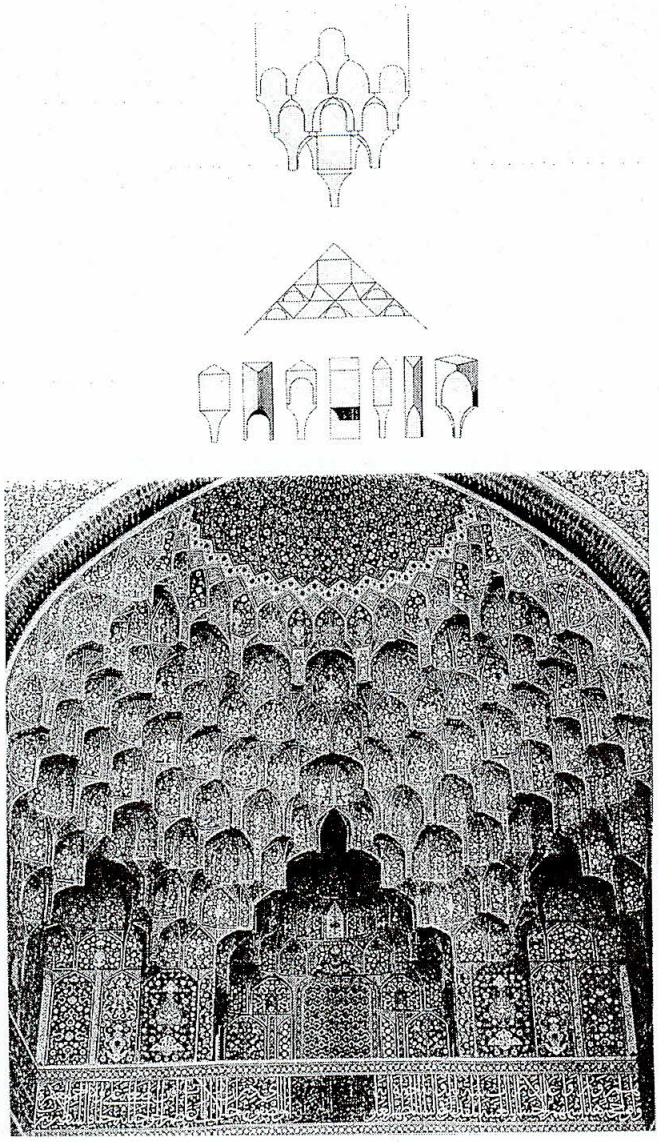


الشكل ٤: نظام العقد المتعامد (cross vault).

أما القباب التي تكون عادة ذات شكل نصف كروي، فقد تطورت طرق ومواد إنشائها فاستخدمت فيها الحجارة والطوب والخشب، كما كان يتم بناء القبة بتنظيم صفوف من الطوب أو الحجارة المنحوتة، التي تتجه لحاماتها نحو مركز القبة كما هي الحال في بناء العقود. وفي بعض الحالات كانت تعمل أعصاب، يملأ الفراغ بينها بصفوف من الطوب أو الحجارة (ribbed dome). كذلك وجدت قباب تعمل من قشرتين، ويكون الشكل الخارجي مختلفا عن الشكل الداخلي، كما وضعت في -بعض القباب الحجرية- سلاسل من الحديد أو قطع من الخشب، وتم تكسية هذا التشكيل من الداخل والخارج بمواد معدنية مختلفة، وخير مثال على هذا النمط من القباب، قبة الصخرة المشرفة التي تزين مدينة القدس, والتي تعد تحفة هندسية مميزة.

إن الحاجة إلى تغطية المساحات الواسعة لقاعات الصلاة، مع مراعاة النواحي الجمالية والبيئية، أدت إلى التطور في استخدام القباب بأنماط متعددة خلال قرون عديدة، ولما كانت هناك مشكلة، في عملية الانتقال من الشكل الدائري عند قاعدة القبة، إلى الشكل المربع لقاعة الصلاة أو الإيوان، فقد تم استعمال مثلثات كروية أو حنيات في الأركان في منطقة الانتقال (squinches)، كما شاع استعمال المقرنصات لتقوم بعملية النقل هذه (أنظر الشكل رقم ٥). وقد انتشر استخدام المقرنصات في إيران وتركيا، وغيرها من بلدان العالم الإسلامي، وأصبحت من المعالم التي تضاف إلى معالم العمارة الإسلامية.

وبعد أن تطور استخدام الخرسانة المسلحة في العالم، أصبح إنشاء القباب باستخدام الخرسانة المسلحة أمرا شائعا، فيتم تجهيز القالب بشكل القبة المطلوب، وبعد وضع حديد التسليح فوقه، يتم صب الخرسانة، ثم بعد حصول الخرسانة على القوة الكافية، يتم فك القالب. ومع تطور استخدام المواد الخفيفة مثل الألمنيوم والبلاستيك والألياف الزجاجية (fiber glass), أمكن إنشاء قباب باستخدام هياكل معدنية مشكلة بشكل القبة، وتكسية هذه الهياكل بأي من هذه المواد الخفيفة.



الشكل٥: استخدام الحنيات والمقرنصات في عملية الانتقال من الشكل المربع إلى الشكل الدائري عند قاعدة القبة.

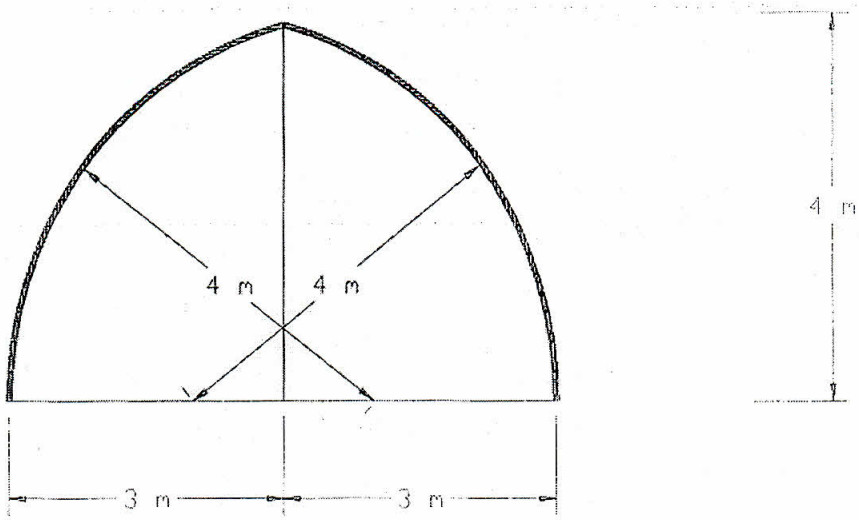
طرق الإنشاء الحديثة واستخدامها في إنشاء الأقواس والقباب

إن التطور الرئيس الذي حصل في علم البناء وتقنياته خلال العقدين الماضيين، كان في استخدام الخرسانة مسبقة الصب، والخرسانة مسبقة الإجهاد، مع تطور طرق التصميم، والتحليل الإنشائي. كما أسهم انتشار استخدام الوحدات مسبقة الصب في إنشاء المباني، لأنه يؤدي إلى تسريع عملية الإنشاء، وتقليل كلفة الإنشاء، مما ساعد في استخدام الوحدات مسبقة الصب (precast units) بواسطة استعمال الرافعات الميكانيكية الحديثة، وأدى ذلك إلى توفير استخدام هذه الوحدات في إنشاء الأقواس والقباب وهو الأمر الذي زاد في مرونة تصميم الأقواس والقباب وتشكيلها، وأدى إلى تخفيض كلفة إنشاء هذه العناصر الإنشائية.

طريقة مقترحة لاستخدام وحدات مسبقة الصب في إنشاء القباب

لقد تم استيحاء فكرة هذه الطريقة من الطريقة المستخدمة حاليا في بناء القباب في المملكة العربية السعودية وبعض دول الخليج، والتي يستخدم فيها الطوب الحراري، الذي يتم بناؤه باستخدام المونة الإسمنتية ويتم التحكم بسماكة هذه المونة، وصولا إلى شكل القبة المطلوبة كما هو واضح في الشكل رقم (٦). وتكمن سلبية هذه الطريقة في كونها تحتاج إلى كمية كبيرة من المونة الإسمنتية، وإلى جهد كبير، نظرا لأن وحدات الطوب المستخدمة ذات شكل متوازي المستطيلات، ولا يوجد فيها انحناء دوراني يعمل على تشكيل شكل القبة. إن هذه الطريقة تعتمد على صب وحدات صغيرة الحجم، في قوالب خاصة مشكلة بطريقة تتناسب مع شكل القبة المطلوب، ثم تجميع هذه الوحدات دون استخدام أي قالب لتشكيل القبة. وقد تم استخدام هذه الطريقة في تجربة لإنشاء قبة مسجد صلاح الدين الأيوبي في مدينة طولكرم بفلسطين، وهي قبة شبه نصف-كروية، طول نصف قطرها ٣ أمتار عند القاعدة وارتفاعها ٤ أمتار كما هو موضح في الشكل رقم (٧).

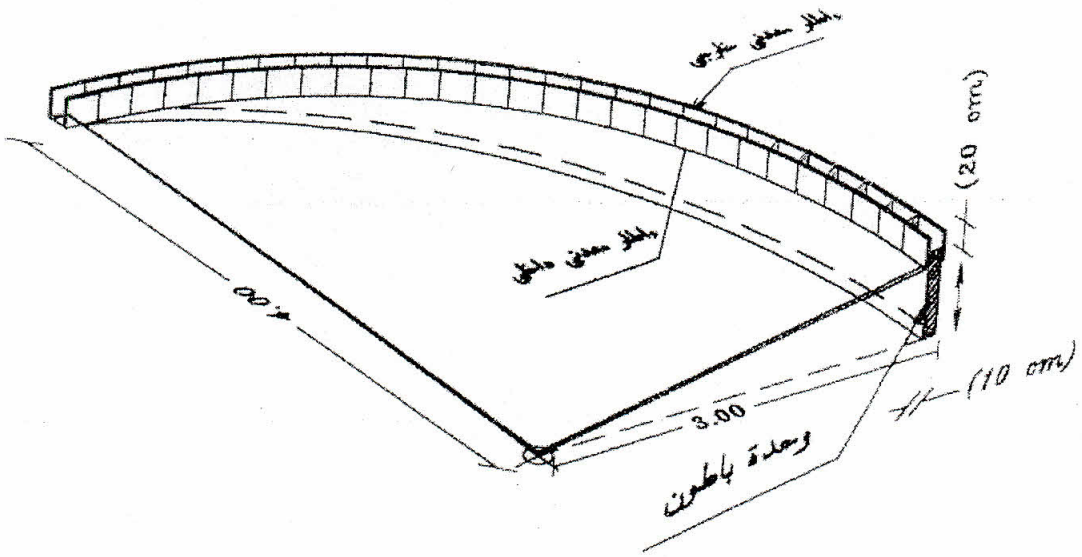
الشكل٦: عملية بناء قبة مسجد الكورنيش في مدينة جدة.



الشكل٧: الأبعاد الهندسية للقبة المقترحة.

وفيما يلي الخطوات التي أتبعت في تنفيذ إنشاء القبة بهـــذه الطريقـــة:

١. تم رسم نصف المقطع الرأسي المار في منتصف القبة المراد تنفيذها على أرضية مستوية أفقيا، ثم تم تشكيل خط الدائـرة بمواسير حديدية، وثبتت بواسطة اللحام الكهربائي. ثم تم تثبيت إطار معدني داخلي لتكون المسافة بين الإطار الخارجي والإطار الداخلي ثابتة وتساوي ١٠سم، وبعد ذلك تم تقسيم الشريحة المشكلة إلى ٢١ قطعة، بواسطة تثبيـــت قطـــع معدنية كما هو مبين في الشكل رقم (٨).



الشكل٨: الإطار المعدني المشكل بشكل نصف القبة.

٢. مع تثبيت محور التماثل على الأرض، تم تحريك الإطار المعدني الذي تم تشكيله، إلى أعلى وأسفل عدة مرات، وباستخدام خرسانة قليلة المرونة، تم تشكيل القطعة المطلوبة، والتي كونت قطعة نموذجية في أحد مداميك بناء القبة.

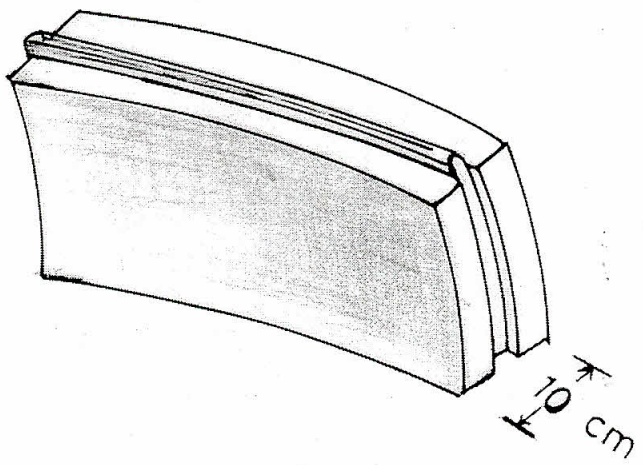
٣. تم تجهيز قالب من الألياف الزجاجية (fiber glass) لكل قطعة نموذجية، وعليه أصبح عدد القوالب مساويا لعدد المداميك التي شكلت بناء القبة، وكانت ٢١ مدماكا في حالتنا هذه.

٤. بعد تجهيز القوالب، تم صب الخرسانة بداخل القالب، نتج عنه نفس شكل القطعة المرادة، وبحساب محيط الدائرة عند كل مدماك، وتقسيمه على عرض القطعة الواحدة، تم إيجاد عدد القطع اللازمة في كل مدماك. ويبين الشكل رقم (٩) شكل قطعة نموذجية بعد أن تم صبها. (لاحظ وجود النتوء من جانب والمجرى من الجانب الآخر ليعمل على زيادة الاحتكاك بين القطع المتراكبة).

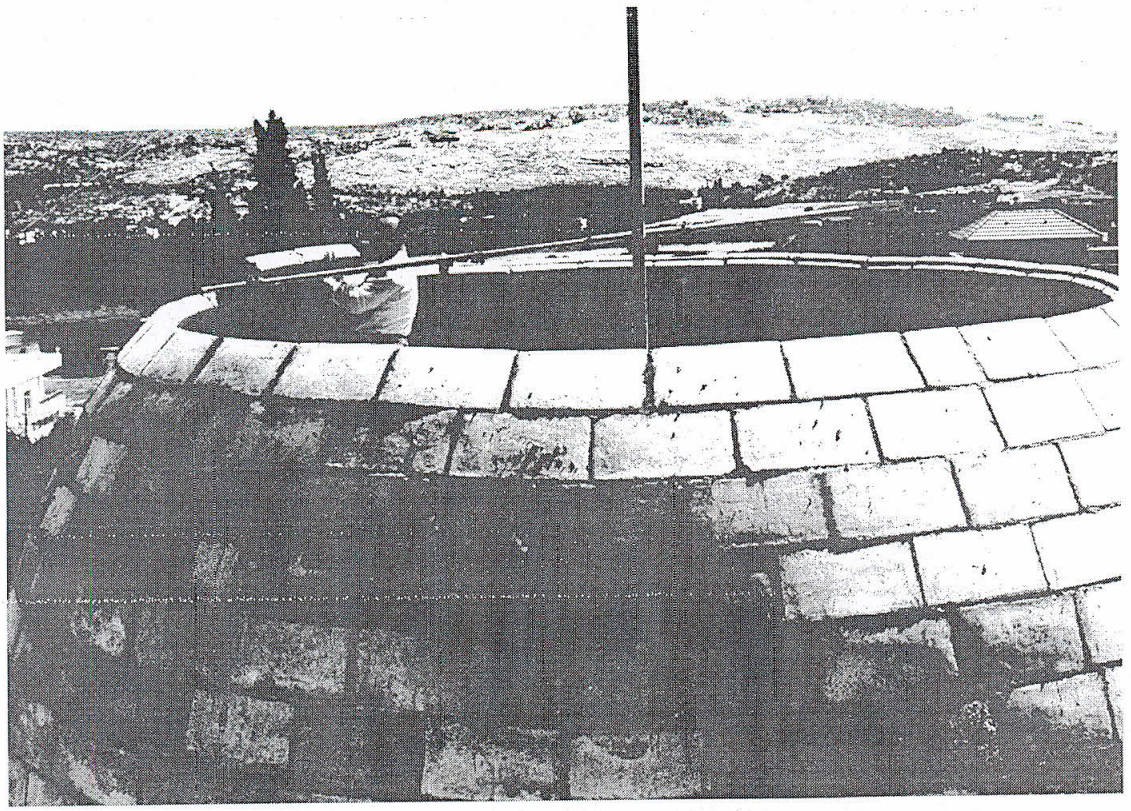
٥. قبل البدء في عملية بناء الوحدات أو القطع التي تم صبها مسبقا، تم تثبيت عمود معدني في وسط القبة الذي مثل محور التماثل في القبة، وثبت على هذا المحور فرجار، استخدم للتأكد من دائرية المداميك أثناء بنائها، كما هو واضح في الشكل رقم(١٠).

٦. تمت عملية تركيب القطع مسبقة الصب في مداميك، باستخدام مونة إسمنتية بسيطة، لأن تماسك القطع بعضها مع بعض يعتمد على المونة الإسمنتية، وعلى الفرزة، أو التسنين الموجود في القطع. وقد تم تحليل القوة الناتجة عن وزن القطعة إلى قوتين: قوة مماسية تشكل قوة الضغط على القطعة، وقوة متعامدة عليها تعمل على محاولة إزاحة القطعة إلى الداخل، فتتم مقاومة هذه القوة بقوة الاحتكاك الناتجة عن المونة الإسمنتية، وعن التسنين أو الفرزة الموجودة في القطعة، كما هو مبين في الشكل رقم (١١).

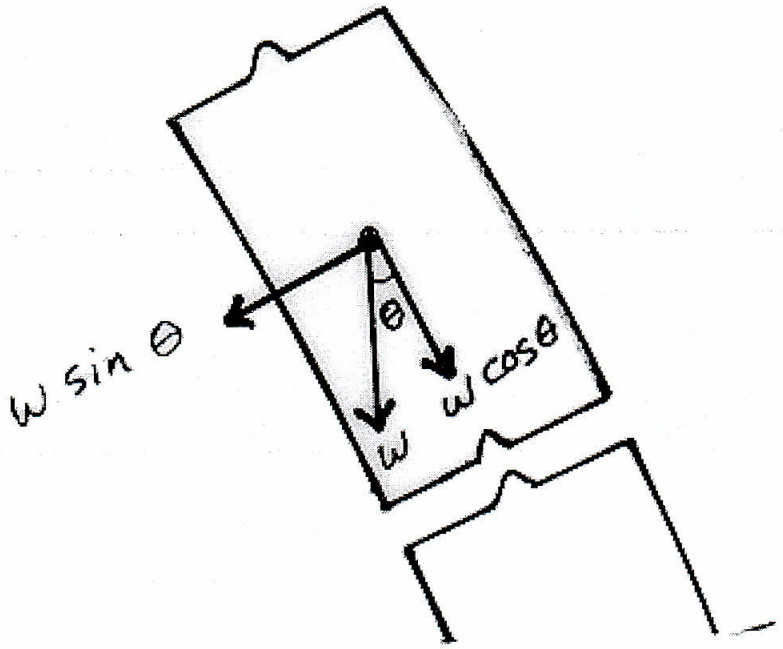
٧. بعد بناء المداميك بعضها فوق بعض، تبعا للتقسيم الذي تم في الخطوة رقم (٢)، أخذت القبة بالتشكل بالشكل المطلوب، كما هو مبين في الشكل رقم (١٢).



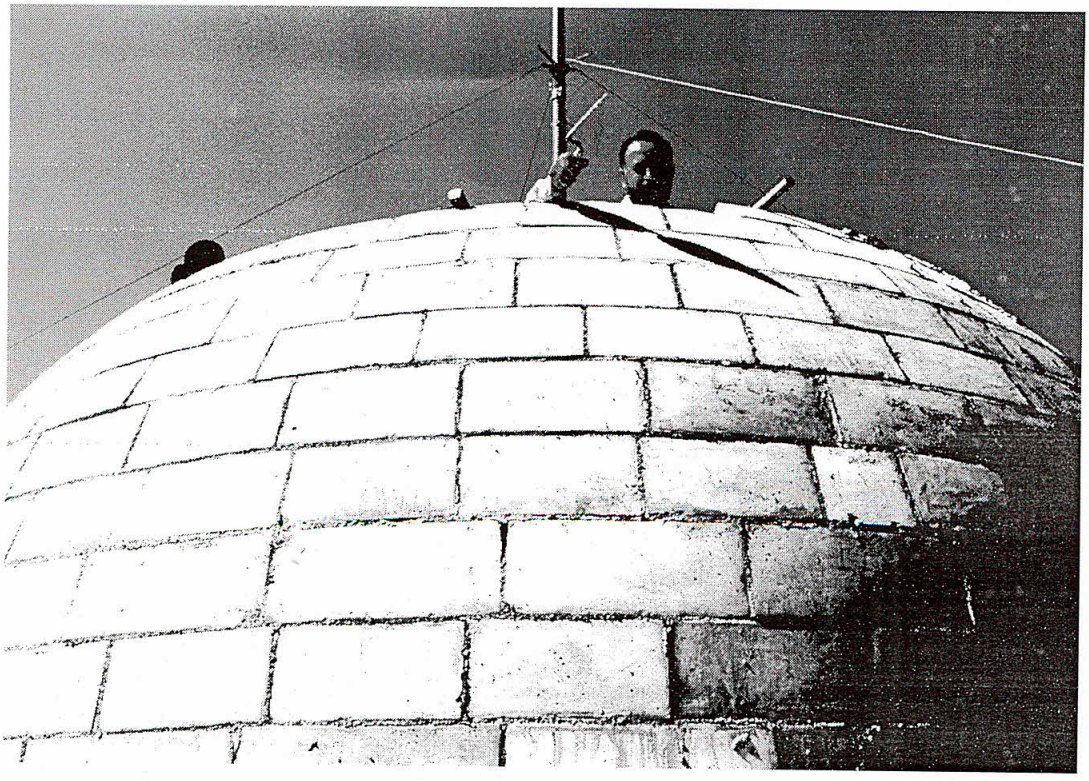
الشكل٩: شكل إحدى القطع النموذجية بعد أن تم صبها.



الشكل١٠: عملية بناء المداميك بالاستعانة بالفرجار .



الشكل١١: تحليل القوة المؤثرة على الوحدات المتراكبة.



الشكل١٢: الوحدات مسبقة الصب بعد أن تم بناؤها تشكل شكل القبة المطلوب.

الخلاصة

بعد أن تم استعراض طريقة استخدام الوحدات مسبقة الصب في إنشاء القباب، وبعد أن تم استخدامها عمليا في إنشاء قبة ذات أبعاد معينة، ومع افتراض إمكان تكرار إنشاء مثل هذه القبة بالأبعاد نفسها التي تعد أبعادا نموذجية لقبة مسجد، يمكن استخلاص المزايا الآتي بيانها لهذه الطريقة:

- عدم الحاجة إلى استخدام القالب الخشبي وسيلة لتدعيم القبة وتشكيلها.
- يمكن استخدام القوالب في تصنيع وحدات متكررة، يمكن استخدامها في إنشاء قباب مماثلة.
- تجنب مشكلة تسريب المياه من سطح القبة، وذلك أن طريقة استخدام الخرسانة العادية فوق القالب الخشبي، تتطلب أن تكون الخرسانة قليلة المرونة، فتكون نسبة فراغات الهواء عالية، وهو يجعل تسرب مياه الأمطار عبر سطح القبة ممكنا. أما في طريقة استخدام الوحدات مسبقة الصب، فيمكن استخدام خرسانة عالية المرونة، مع إمكان الدمك لطرد فراغات الهواء.
- يمكن الاستغناء عن القصارة (اللياسة) الداخلية والخارجية لسطح القبة، نظرا لأن الوحدات مسبقة الصب، تكون ذات سطوح ملساء، وذات مظهر جيد، لا تحتاج إلى القصارة.

- خفض التكاليف، إذ يمكن الاستغناء عن الدعامات والقالب الخشبي المستخدم في إنشاء القباب بالطريقة المعتادة. كذلك فإن طريقة الوحدات مسبقة الصب، لا تحتاج إلى استخدام قضبان حديد التسليح عالي التكاليف. هذا بالإضافة إلى خفض التكاليف نتيجة عدم الحاجة لاستخدام قصارة داخلية وخارجية للقبة .
- تقليل الجهد بالمقارنة مع أسلوب التنفيذ التقليدي للقباب، والذي لا يخلو من صعوبات كبيرة في التحكم بالشكل المطلوب، ودقة التنفيذ .
- الأسلوب الجديد يوفر إمكان استخدام أشكال متعددة للقباب بطرق سهلة، وعلى درجة عالية من الإتقان .

المراجع

[١] فكري، أحمد. *مساجد القاهرة ومدارسها*، الجزء الأول، القاهرة: دار المعارف، ١٩٦٥.

[٢] مصطفى،صالح لمعي. *القباب في العمارة الإسلامية*. بيروت: دار النهضة العربية للطباعة والنشر، ١٩٧٥م.

[٣] Papadopoulo, Alexandre. *Islam and Muslim Art.* New York: Harry N. Abramc, Inc. Publisher, 1979.

[٤] Rafay, Tariq. "Impact of Developments in Building Science and Technology on Islamic Architecture." *Proceeding Of the 8 Th Annual Conference of the Association of Muslim Scientists & Engineers*, USA, 1982, p.p. 326-339.

[٥] البهنسي، عفيف. *العمارة عبر التاريخ*. دمشق: دار طلاس، ١٩٨٧.

[٦] الوكيل، عبد الواحد. "تصميم عمارة المساجد في المملكة العربية السعودية"، *مجلة البناء*، العدد ٣٤، ١٩٨٧.

[٧] Frishman, Martin and Khan, Hasan-Uddin. *The Mosque: History, Architectural Development & Regional Diversity* London: Thames and Hudson, 1994.

[٨] Michel, George. *Architecture of the Islamic World.* London: Thames and Hudson, 1995.

[٩] Serageldin, Ismail and Steele, James. *Architecture of the Contemporary Mosque.* London: Academy Editions, 1996.

Using Precast Units in Dome Structures: The Dome of Salah Al-Dean Mosque in Tolkarem, Palestine

Riyadh Abdulkareem Awad

College of Engineering, Najah University
Nablos, Palestine

Abstract: This paper describes a new method in constructing domes which was actually used in the construction of Salah Al-Dean Alyoubi's Mosque in Tolkarem, Palestine. The principles of this method, which has proved its efficiency, were derived from traditional methods of dome construction used in Islamic Architecture. The utilization of reinforced concrete in dome construction had some drawbacks, especially in the necessity of formworks that has the exact shape of the dome. This led to the development of the new proposed method. Precast concrete units were utilized, without the need for any formwork. This paper describes this method after analyzing various methods of dome construction. The advantages and disadvantages of each method is also descussed.