الفصل الثاني

المنشآت السطحية المنحنية

Curved Surface Structures

مقدمة

2-1. تعاريف

2-2. أنواع المنشآت السطحية المنحنية Types of Curved Surface Structures

2-3. مساند المنشآت المنحنية Shells Support

2-4. التحليل الانشائي للقشريات Structural Analysis of Shells

2-5. الجدار القشري Shelled Wall

2-6. القشريات مفردة الانحناء Shells of Single Curvature

2-6-1. القشرية المخروطية Conical Shell

2-6-2. القشريات الاسطوانية (القبوات (Cylindrical Shells (Vaults)

2-6-3. القشريات الاسطوانية للإضاءة الشمالية Cylindrical Shells for North Light

2-7. القشريات مزدوجة الانحناء Shells of Double Curvature

2-7-1. القباب

2-7-2. الجسم المكافئ الناقصي Elliptic Paraboloid

2-7-3. المجسم الزائدي الدوراني من قطعة واحدة

2-7-4. المجسم المكافئ الزائدي Hyperbolic Paraboloid

2-7-5. الموشور (المجسم) المخروطي

2-8. قشريات خاصة: Special Shells

2-9. القشريات الفراغية

مقدّمة

تعتبر المنشآت السطحية المنحنية المجال الواسع لاستعمال البيتون المسلح وحديثاً اللدائن المسلحة. وطبقاً لتعبير أحد المعماريين الإيطاليين (بونتي Ponti) ان هذا العصر هو عصر البيتون المسلح لأنه حرر العمارة من الشكل المستطيل. كذلك فإن البيتون المسلح حرر العمارة من تحديدات الأشكال التي كانت تفرضها مواد الإنشاء القديمة كالخشب والحديد (مثل استخدام جملة العمود والجائز). وإذا استندنا الى تعبير المهندس نيرفي Nervi فإن مادة البيتون بسبب طبيعة صنعها (إذ تصب قطعة واحدة بالقالب ويمكن صب أي شكل) قد وسعت مجال العمارة لأفق غير محدود.

وإذا علمنا أن اللدائن المسلحة لها نفس ميزات البيتون من حيث طبيعة الصنع نستنتج أن اللدائن المسلحة هي المنافس للبيتون المسلح للاستخدام في المنشآت السطحية المنحنية. والحقيقة ان اللدائن المسلحة تصبح منافسة للبيتون من الناحية الاقتصادية في المجازات الكبيرة فقط ولا يزال البيتون المسلح هو المفضل في المجازات التي تقل عن ذلك وخاصةً أنّه يتفوق على اللدائن المسلحة بموضوع مقاومة الحريق.

تعتمد القشريات الرقيقة – من الناحية الانشائية – على شكلها لمقاومة الأحمال وهذا معاكس للنوع الآخر من الجمل الانشائية الذي يعتمد على كتلته. إن هدف مصمم القشرية هو الحصول على قشرية رقيقة للدرجة التي تسمح بها الاعتبارات الفعلية للتنفيذ. وبهذه الطريقة نخفف الأوزان الميتة وتتحرر القشرية من عزم الانعطاف وتصبح خاضعة لإجهادات غشائية فقط (أي قوى محورية) وبذلك تستخدم كمية المواد بالحد الأدنى وبأفضل استخدام انشائي.

لقد عم استخدام القشريات حديثا (منذ عام 1920) باستثناء القباب حيث كانت تستخدم منذ قديم الزمان وكانت تصنع من الحجر. ولكن القباب الحديثة تعتبر تطويرا كبيرا للقباب القديمة حيث جرى تخفيض السماكات بشكل كبير. مثلا قبة البانثيون في روما قد بنيت منذ حوالي الفي عام بقطر حوالي 44 م وبسماكات تتراوح بين (1.2 – 2.5) م وكانت مادة الانشاء هي الطوب مع البيتون بشكله البدائي ايام الرومان. اما حديثا فقد بنيت قبة قصر الرياضة الصغير في روما ايضا بقطر قدره ستون مترا وبسمك عشرة سنتيمترات فقط مع اعصاب من الحديد والبيتون بسمك اربعون سنتيمتر فقط.

ان أول نوع من القشريات جرى استخدامه هو القشريات الاسطوانية وذلك لسهولة حل هذه القشريات ولم يبحث المصممون عن أشكال أخرى من القشريات حتى أواسط الثلاثينات وأوائل الأربعينات حيث بدأ القطع المكافئ الزائدي بالانتشار وذلك لسهولة صنع قالبه اذ أنه يتولد من خطوط مستقيمة بالرغم من انحنائه، ولسبب

آخر مهم جداً هو أن بعض المهندسين توصل إلى طريقة لتصميم هذا النوع من القشريات فتم البدء باستخدامها اعتماداً على ذلك التصميم .

وتجدر الإشارة في هذا المجال الى ان المنشآت القشرية بشكل عام كانت مكن الحلول الشائعة لدى الانشائيين مع ظهور البيتون المسلح في الوقت الذي كان المعماريون لا يزالون يسيرون بالعمارة بالأشكال التقليدية المألوفة في الجديد والخشب. كما يقول الدكتور رأفت: " لقد فتح المجال لتجارب انشائية قادها الإنشائيون وتوصلوا فيها لتجمعات هندسية جديدة وأصبح أمام المعماريين إمكانيات واسعة من التكوينات الجديدة المشجعة. لقد زال الجمود الذي جلبه الارتباط بالقصر التكعيبي وحلياته المختلفة وانطلق التشكيل المعماري إلى مجال الاستمرار الهندسي والمادة على مستوى الوحدات الإنشائية الخطية او المستوية. انتقل الإنشاء من مجال الزوايا القائمة الناتجة عن الرأسيات والأفقيات الى الاستمرار الذي يحقق وفراً هائلاً في استعمال المادة، وابتدأت مرحلة جديدة تحت قيادة الانشائي، وتجاوبت العمارة ببطء وتردد ناتج عن عدم دراية كاملة بالأسس الإنشائية المستحدثة وبآثارها وإمكانياتها المعمارية. كما يجب عدم إغفال دور الكيميائيين ورجال الصناعة، فمجهوداتهم لا تقل أهمية عن مجهودات الإنشائيين والمعماريين لتطوير مادة البيتون المسلح وإمكانياته، لذلك فإن مجهوداتهم بتطوير مادة اللدائن المسلحة (حتى اصبحت اليوم من المواد الانشائية الهامة في مجال القشريات) يجب ان تذكر.

1-2. تعاريف: Definitions

قبل البدء بشرح انواع المنشآت السطحية المنحنية يجب تعريف بعض التعابير التي سترد اثناء الشرح.

1-1-2. السطح الدوراني: Surface of Revolution

يتشكل هذا السطح من دوران منحني (او مستقيم) حول محور افقي واقع في مستويه. من امثلة هذا السطح: المخروط – القبة – القطع الزائد الدوراني.

2-1-2. السطح الانتقالي: Surface of Translation

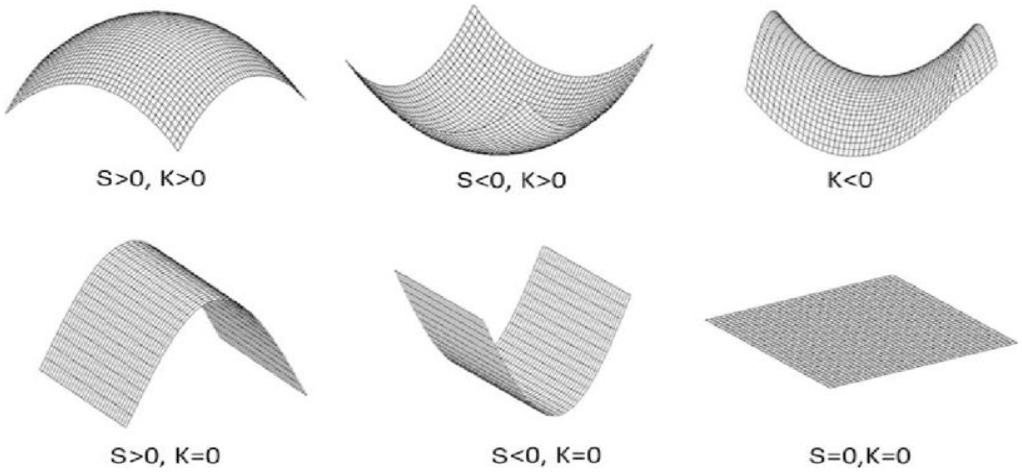
يتشكل السطح الانتقالي من حركة منحني في مستوي ما على منحني آخر في مستوي متعامد مع الاول. يمكن أن يكون المنحني الآخر خطاً مستقيماً، كما يمكن أن يكون منحنياً وله نفس معادلة المنحني المتحرك. نجد أمثلة لهذا السطح في الجسم المكافئ الناقصي أو الدائري أو حتى الجسم المكافئ الدوراني.

3-1-2. السطح المسطر: Ruled Surface

يتشكل السطح المسطر من حركة مستقيم يكون هو المولد " Generator " او المسطر للسطح. يمكن أن يكون السطح مفرد التسطير Single Ruled، إذا كان لكل نقطة من السطح لا يمر إلا خط مستقيم واحد. ويكون السطح مزدوج التسطير Double Ruled إذا كان يمر بكل نقطة من السطح خطين مستقيمين، يعتبر المخروط والجسم المخروطي Conoid والأسطوانة نماذج للأسطح مفردة التسطير ويعتبر القطع المكافئ الزائدي والمجسم الزائدي الدوراني من قطعة واحدة نماذج للأسطح مزدوجة التسطير.

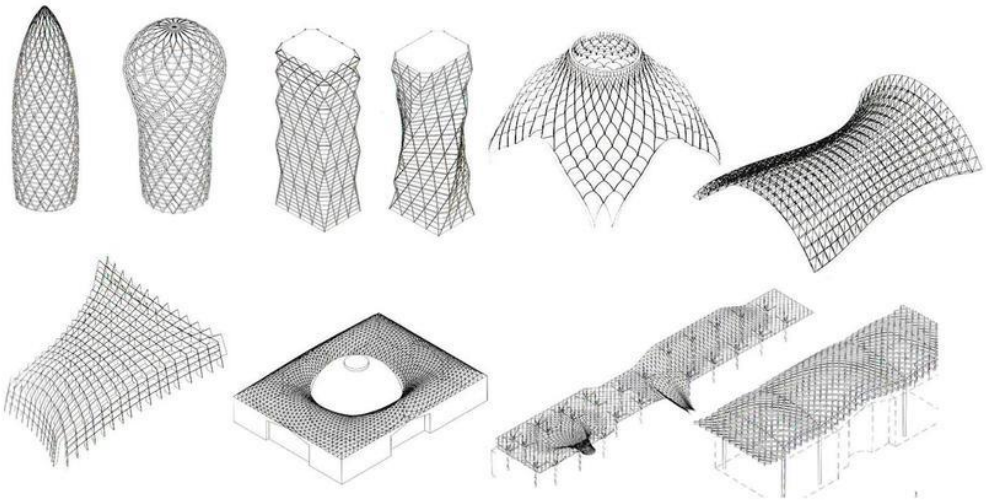
تتميز الاسطح المسطرة عن غيرها بقابلية تنفيذ قالبها بسهولة لأنها تتشكل من خطوط مستقيمة. يجب ملاحظة أن السطح المسطر قد يكون دورانياً ايضاً كما يمكن ان يكون انتقالياً ومسطراً بذات الوقت. ويمكن في بعض الحالات الخاصة ان يكون السطح مسطراً ودورانياً وانتقالياً في نفس الوقت (كما في الاسطوانة الدائرية).

2-1-4. انحناء غاوس: Gaussian Curvature



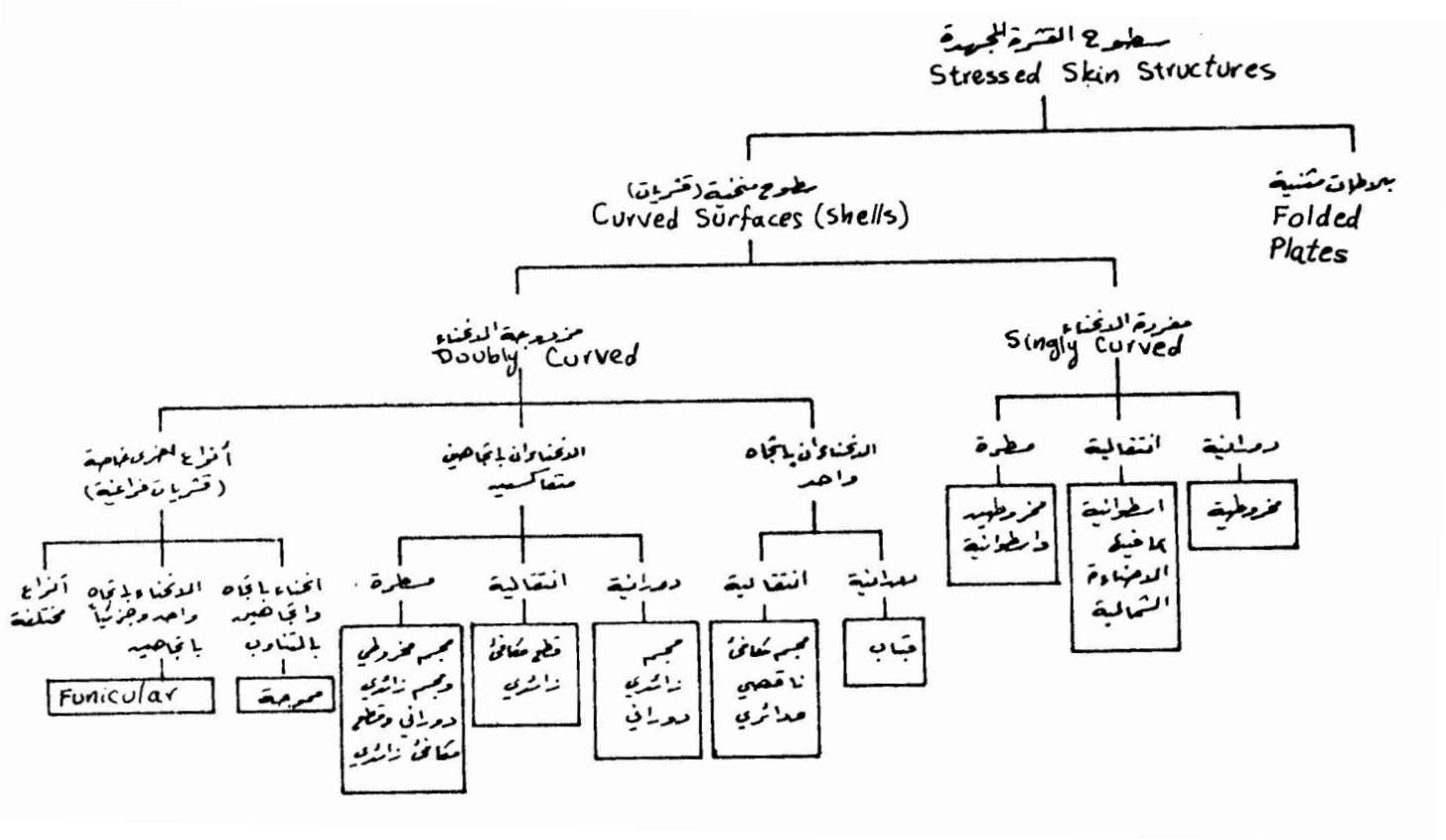
إذا سمينا الانحناء $1/\rho$ (حيث نصف قطر الانحناء ρ)، نجد في كل نقطة انحناء في الاتجاهين X,Y هما ($1/\rho_X$, $1/\rho_Y$) وجداء الانحناءين ($1/\rho_X * 1/\rho_Y$) يسمى انحناء غاوس. عندما يكون الانحناءان في جهة واحدة نحصل على انحناء غاوس موجب (مثل حالة القبب الدورانية والمجسم المكافئ الناقص ...الخ). وعندما يكون أحد الانحناءين صفراً وبالتالي الجداء صفراً فيكون أحد المنحنيين خطاً مستقيماً أي تكون القشرية مفردة الانحناء: Singly Curved أما عندما يكون الجداء سالباً فيكون الانحناءان باتجاهين متعاكسين.

2-2. أنواع المنشآت السطحية المنحنية: Types of Curved Surface Structures



تسمى أحياناً هذه المنشآت باسم سطوح القشرة المجهدة أي أن هذه السطوح رقيقة كالقشرة ومجهدة بإجهادات واقعة في مستويها. وتسمّى البلاطات المثنية بنفس التسمية أيضاً. والحقيقة أن أحد النوعين هو حالة خاصة من الآخر، فيمكن أن نقول أن البلاطات المثنية هي سطح قشري بعدد محدود من الأسطح أو نقول أن القشريات هي بلاطات مثنية ازداد عدد أسطحها الى اللانهاية فأصبحت اسطحاً منحنية. يمكن تلخيص أنواع المنشآت السطحية المنحنية (وسطوح القشرة المجهدة عموماً) بالشكل (4 – 12).

بمقارنة السطوح مفردة الانحناء مع السطوح مزدوجة الانحناء نجد أن السطوح مفردة الانحناء هي سطوح قابلة للنشر Developable أي أنها تنشر إلى سطح مستوي بدون استطالة أو تقليص لأي جزء منها أما السطوح مزدوجة الانحناء فهي غير قابلة للنشر الى سطح مستوي. فمثلاً لا يمكن عمل مستو من قبة كروية. إن هذه الخاصية تجعل القشريات مزدوجة الانحناء أكثر مقاومة للانحناء من القشريات مفردة الانحناء لأن الاخيرة لها قابلية لأن تفتح وتصبح مستوية بينما ليس للمزدوجة تلك القابلية.

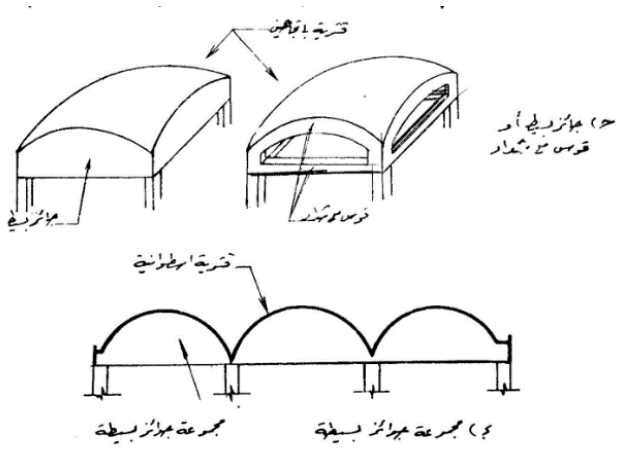


الشكل (4 – 12) أنواع سطوح القشرة المجهدة

3-2. مساند المنشآت المنحنية Shells Support

قبل أن ينتقل حمل القشرية للأعمدة والأساسات، ينتقل الى مسند القشرية ومسند القشرية هو الذي ينقل الحمل الى الأعمدة. يسمى مسند القشرية " الحجاب " Diaphragm ويكون الحجاب عادة ذو عزم عطالة كبير جداً في المستوي الذي يحمل القشرية، وذو عزم عطالة صغير جدا (نسبيا) في المستوي المتعامد عليه.

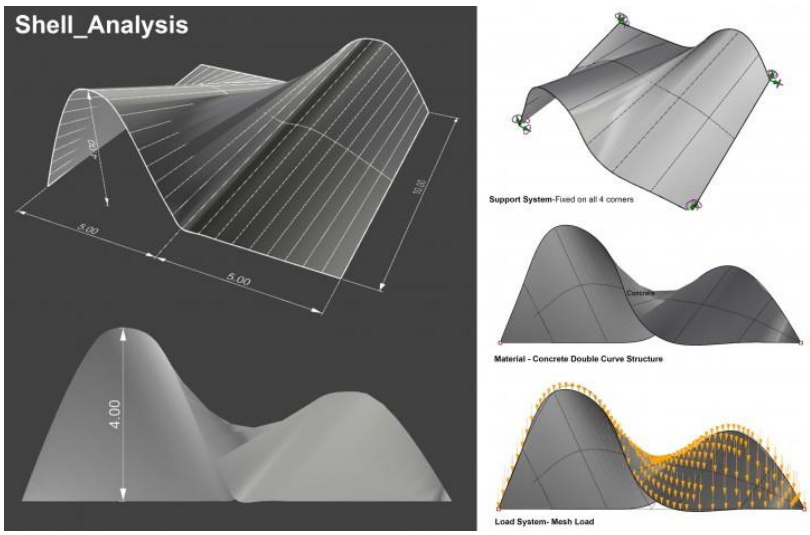
يمكن للحجاب أن يكون بشكل جائز أو بشكل إطار أو قوس أو شبكي اذا لزم الأمر. إن ضرورة الحجاب للقشرية تشبه ضرورة الجائز للبلاطة المستوية، كما أنه للبلاطة ذات الاتجاه الواحد يكفي عملياً جائزين (واحد في كل جهة) فكذلك يكفي للقشرية ذات الاتجاه الواحد حجابين واحد في كل جهة. وكما تحتاج البلاطة المستوية ذات الاتجاهين الى أربعة جيزان على المحيط، فكذلك تحتاج القشرية ذات الاتجاهين الى أربعة أحجبة على محيط القشرية.



يوضح الشكل (4 – 14) أشكال مختلفة للأحجبة المستخدمة بالقشريات

إذا جرى تنفيذ القشرية بدون حجاب، أي جرى سندها على الأعمدة مباشرة، فإن القشرية تميل لأن تفتح وتصبح مستوية عند تعرضها للأحمال، ولكن إذا رُبط طرف القشرية بحجاب فإن الحجاب يمنعها من أن تفتح، وبالتالي يزيد من مقاومتها مرات عديدة. ولذلك لا ينصح أبداً بالاستغناء عن الحجاب الطرفي.

4-2. التحليل الانشائي للقشريات: Structural Analysis of Shells



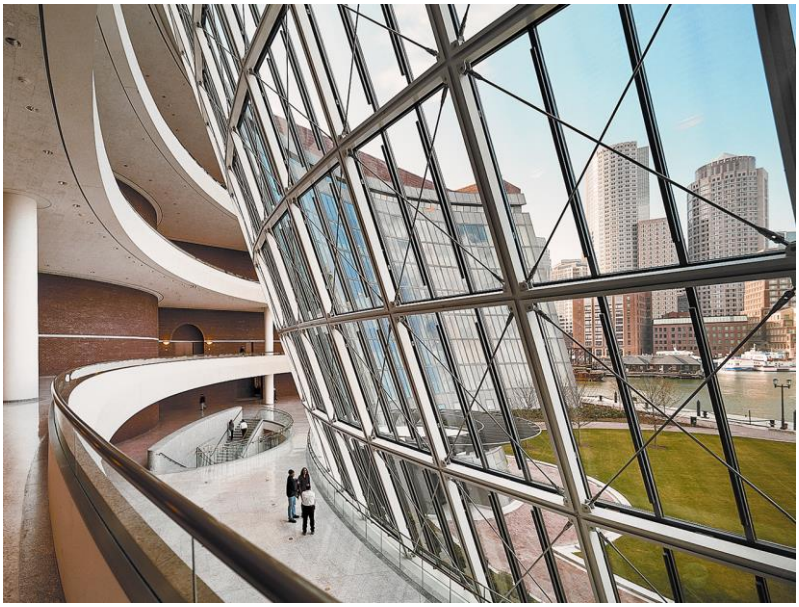
حتى يكتمل تحليل القشرية يجب أن يجري تحليلها بالاتجاهين، سواء كانت القشرية طويلة (اتجاه واحد) أو قصيرة (اتجاهين). فإذا كانت القشرية طويلة كالقشرية الأسطوانية مثلاً فإن التحليل العرضي يكون لشريحة بعرض واحدة المسافة (1 متر)، وتدرس هذه الشريحة باعتبارها قوسا متمفصلة الطرفين (إذا كانت القشرية ذات فتحة واحدة فقط)، أو قوساً موثوقة الطرفين (إذا كانت القشرية بأكثر من فتحة وكنا ندرس الفتحة الوسطية). من التحليل العرضي هذا، يمكن أن نحدد سماكة القشرية وتسليحها العرضي. بعد ذلك نقوم بالتحليل الطولي للقشرية، فنعتبر كل فتحة بالقشرية كجائز بسيط يستند على مسندين بسيطين، وهذين المسندين هما الحجابين بطرفي القشرية، ومن هذا التحليل نحدد الأبعاد النهائية للقشرية (كالارتفاع) وكذلك تسليح القشرية الطولي. بعد ذلك ندرس الحجاب والأعمدة والأساسات.

أما في حالة القشرية القصيرة فإنه يجري تطبيق النظرية الغشائية التي تعتبر أن القشرية معرضة لقوى محورية فقط نتيجة تأثير قوى موزعة على السطح. ومن النظرية الغشائية يمكن معرفة القوى في الاتجاهين وبالتالي حساب سماكة القشرية وتسليحها بالاتجاهين. وبعد ذلك ندرس الأحجبة على محيط القشرية لتتحمل القوى في القشرية الناتجة من النظرية الغشائية، وذلك عند خط تلاقي القشرية مع الحجاب الطرفي. ويجب أن

ننبه هنا إلى أنه سيتولد عزوم انعطاف في القشرية عند تلاقيها مع الحجاب الطرفي، بالرغم أن النظرية الغشائية لا تقول ذلك. ولذا يجري تسميك القشرية عند تلاقيها مع الحجاب الطرفي بحدود (1/10) المجاز (تزداد السماكة بحدود 50 % بالمية تدريجياً). كذلك يوضع تسليح مزدوج في هذه المنطقة.

ونفرق بين القشرية الطويلة والقشرية القصيرة بمقارنة أبعاد القشرية مع بعضها. فإذا كانت نسبة الطول للعرض L/b أكبر أو تساوي 3 (بعض المراجع تحددها بـ 5)، فإن القشرية تسمى قشرية طويلة Long Shell ، وتتصرف مثل البلاطات ذات الاتجاه الواحد، أما اذا كانت النسبة أقل من ذلك فإن القشرية تسمى قشرية قصيرة Short Shell، وتتصرف بما يشبه البلاطة ذات الاتجاهين. والفرق الأساسي بين النوعين أن القشريات القصيرة تتبع النظرية الغشائية Membrane Theory تماماً (عدا منطقة التلاقي مع الحاجب حيث يحصل بعض العزوم)، بينما لا تتبع القشريات الطويلة النظرية الغشائية إلا جزئياً وخاصة عندما تكبر L/b حيث يصبح تصرف القشرية مشابهاً لتصرف الجائز البسيط تماماً، لذلك نعتمد بالحل على النظرية الجائزية Bean Theory.

2-5. الجدار القشري: Shelled Wall



يمكن استخدام الجدار بشكل قشرية (أي جدران قشرية أو مموجة)، وبهذه الجدران – وهي أسطح منحنية – تكون الأحمال الرئيسية ناظمية، أي في مستوي السطح. والعزوم التي تأتي للسطح تنشأ من قوى متعامدة مع مستوي السطح وهذه تنتج بصورة أساسية عن الرياح. وعندما يكون ارتفاع المبنى ليس كبيراً جداً، فيكون تأثير

الرياح ضعيف بالنسبة لتأثير القوى المحورية. وبهذه الحالة تكون الفائدة التي نحصل عليها باستخدام السطح المموج لمقاومة الرياح ليست هي السبب الرئيسي التي تدعو لهذا الاستخدام، وإنما هناك سبب آخر هام جداً، ألا وهو تخفيف أو حتى إلغاء تأثير التحنيب نتيجةً لزيادة عزم عطالة المقطع العرضي. وينتج عن ذلك زيادة قيمة الاجهاد المسموح فيه على الضغط، مما يجعل استخدام المادة فعالاً أكثر ولهذا السبب نجد أن استخدام الجدران القشرية من البيتون المسلح غير شائعة إلا بحالة الجدران، إذ أن التحنيب يزداد في هذه الجدران كما أن عزم الرياح يصبح ذا قيمة لا يستهان بها، بينما في الجدران غير المرتفعة يكون تأثير التحنيب ضعيفاً ويكون عزم الرياح صغيراً وبذلك سيكون الوفر الذي سينتج في المواد أقل من الكلفة الزائدة في القالب واليد العاملة، نتيجة استخدام الجدار القشري، ولهذا يجب أن نكون حذرين من استخدام هذا النوع من المنشآت في حالة البيتون المسلح.

إذا استخدمنا مواد أخرى غير البيتون المسلح كالحديد او الألمنيوم او اللدائن المسلحة، فإن استخدام الجدران القشرية يكون مفيداً جداً نظراً لإمكانية الحصول على سماكات رقيقة من هذه المواد مما يجعل تأثير التحنيب ذا قيمة كبيرة. وكذلك فإن العزوم الصغيرة الناتجة عن الرياح تكون كبيرة بالنسبة للسماكات الرقيقة التي تعتبر الحد الأدنى لمثل هذه المواد التي تقاس بالميليمتر عادة. لذلك نعتبر أن استخدام الجدران القشرية من هذه المواد مقبول حتى مع الارتفاعات الصغيرة (2-3 م مثلاً).

6-2. القشريات مفردة الانحناء: Shells of Single Curvature

تعتبر هذه القشريات من الأسطح المسطرة التي يمكن أن تولد من خط مستقيم، وهذا مما يسهل صنع القالب، وبالتالي يخفف من التكاليف وهذا أحد الأسباب الذي يجعلها كثيرة الانتشار، والسبب الثاني هو معرفة كيفية تصرف هذه القشريات من الناحية الانشائية وبالتالي سهولة تصميمها. ومن أهم هذه القشريات يمكن أن نذكر المخروط والقبوات الأسطوانية.

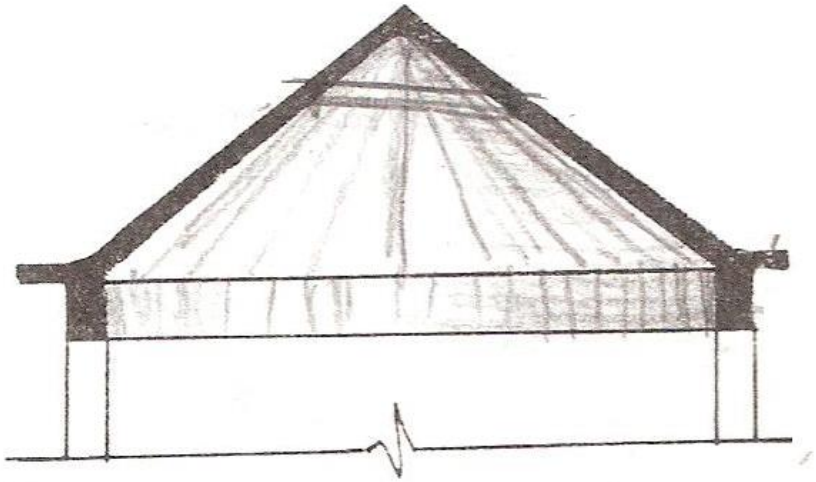
2-6-1. القشرية المخروطية: Conical Shell

يعتبر المخروط هو الممثل الاساسي للقشريات الدورانية مفردة الانحناء، ويستخدم للأسقف الشكل (4 – 15). ويمكن أيضاً استخدام جذع المخروط وذلك في حالة لزوم وضع فتحة إنارة عند أعلى المخروط.

يجرى تصميم المخروط باتجاهين: اتجاه أفقي (محيطي) واتجاه شاقولي (مولدي)، ويمكن مقارنة المخروط بالهرم بحالة البلاطة المثنية. ويلاحظ بأن رد الفعل المولدي بالأسفل يكون مائلاً، لذا يجرى مقاومته بجائزين: الأول أفقي حلقي لمقاومة المركبة الأفقية والثاني شاقولي حلقي أيضاً لمقاومة المركبة الشاقولية. ويمكن أيضاً الاكتفاء بجائز واحد شريطة تصميم هذا الجائز على قوة مائلة وبالتالي على عزم مركب بالإضافة للفتل الذي سينتج بسبب كون الجائز حلقياً. يلاحظ زيادة سماكة القشرية بحدود (50 – 100 %) قرب الجائز ولمسافة قليلة وذلك لتغطية عزوم الانعطاف التي ستحدث بالقشرية عند اتصالها مع الجائز وعند استخدام جذع المخروط لوضع فتحة الإنارة في السقف، فيجب وضع جائز حلقي عند محيط فتحة الإنارة لتأمين استمرار سطح المخروط الذي توقف نتيجة لوجود الفتحة.

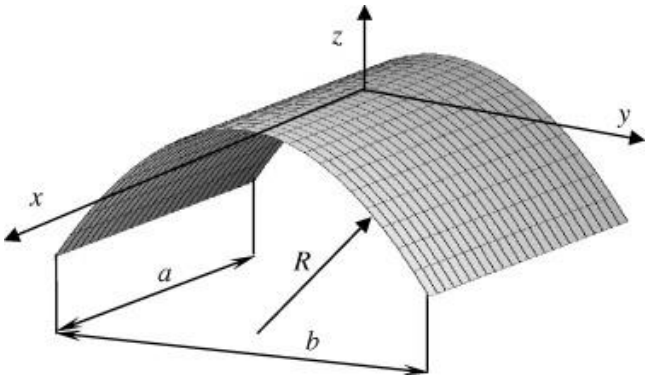
يستند الجائز الحلقي الحامل للقشرية على أعمدة. كما يمكن أن تستند القشرية على جدار دائري وفي هذه الحالة نستغني عن الجائز الحامل.

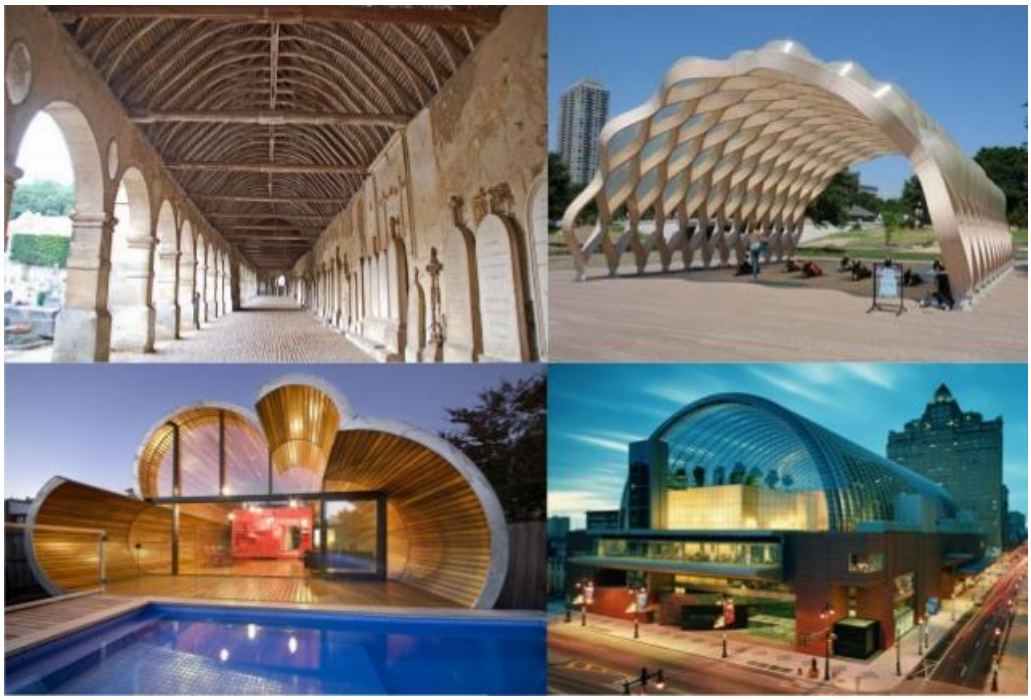
يمكن استخدام المخروط بأقطار تصل حتى 30 متر وتكون سماكة القشرية بحدود (8 – 12) سم.



الشكل (4 – 15) سقف مخروطي

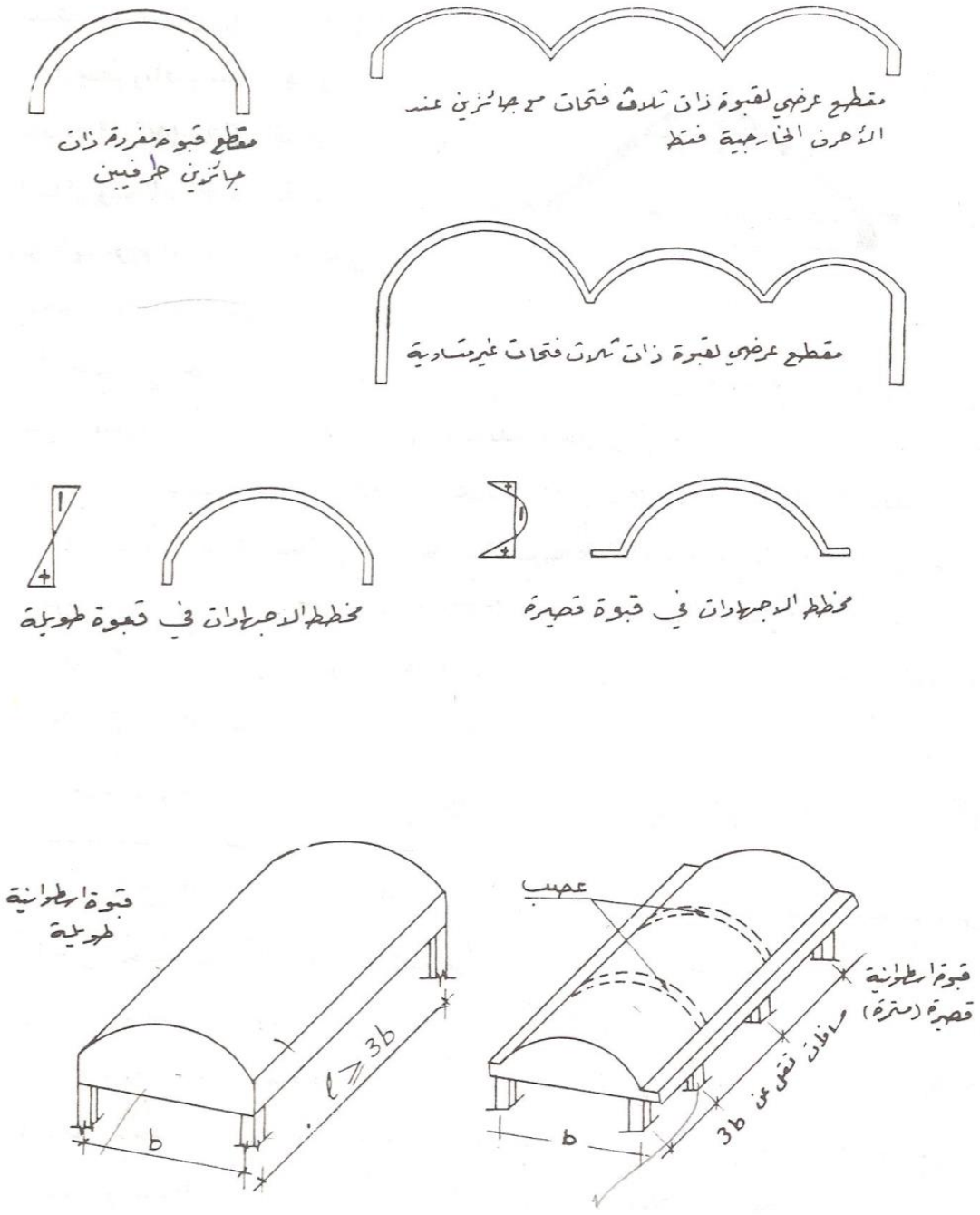
2-6-2. القشريات الاسطوانية (القبوات): Cylindrical Shells (Vaults)





تتشكل القشرية الاسطوانية من حركة خط مستقيم على منحنيين متماثلين ومتوازيين، بحيث يبقى الخط مستقيم موازياً لمستوي متعامد مع المنحنيين السابقين، ومن هذا التعريف نعتبر القشريات الأسطوانية قشريات انتقالية مسطرة. وبالطبع تكون القشرية جزءاً من أسطوانة. يمكن أن يأخذ المقطع العرضي للأسطوانة أشكالا هندسية متعددة مثل الدائرة والقطع المكافئ والقطع الناقص أو المنحني التدويري (سيكلويد Cycloid) أو منحني السلسلة ... الخ.

يمكن أن تكون القبوة Barrel Vault مفردة او متعددة الفتحات ويمكن أن تكون ذات مجاز واحد أو اكثر ويمكن أن تكون الاثنان معاً أي ذات عدة فتحات وعدة مجازات كما هو موضح بالشكل (4 – 16).



الشكل (4 – 16) اشكال مختلفة للقبوة الأسطوانية

تستند القبوة الطويلة المبينة بالشكل (4- 16) على الحجابين الطرفيين فقط، وإذا كانت هذه القبوة مستمرة فتستند على مساند وسطية بشكل اعصاب.

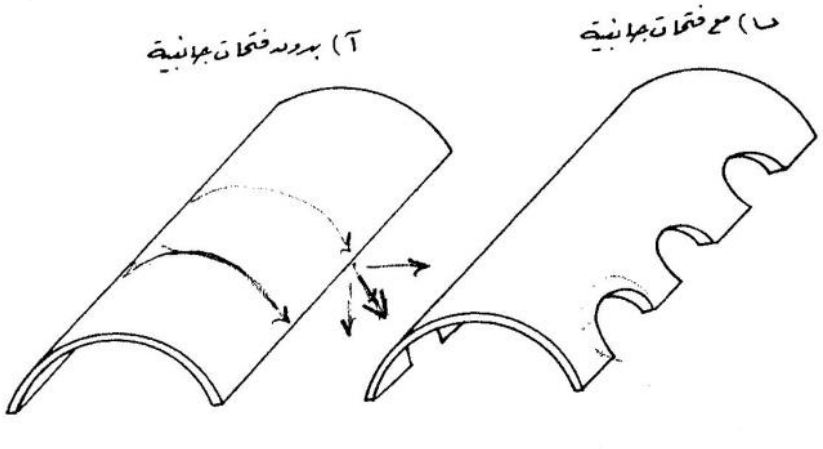
يكون تصرف القبوة الطويلة مماثلا لتصرف الجائز تماماً ويكون مخطط الإجهادات بشكل خط مستقيم كما في حالة الجائز تماماً.

أما القبوة القصيرة (L< 3b) فيمكن أيضاً أن تكون بسيطة ومستندة على حجابين طرفيين وجائزين حرفيين أو مستمرة وتستند على أعصاب بالإضافة للمساند السابقة. يماثل تصرف هذه القبوة تصرف الجائز العميق ويكون مخطط الإجهادات بشكل منحني.

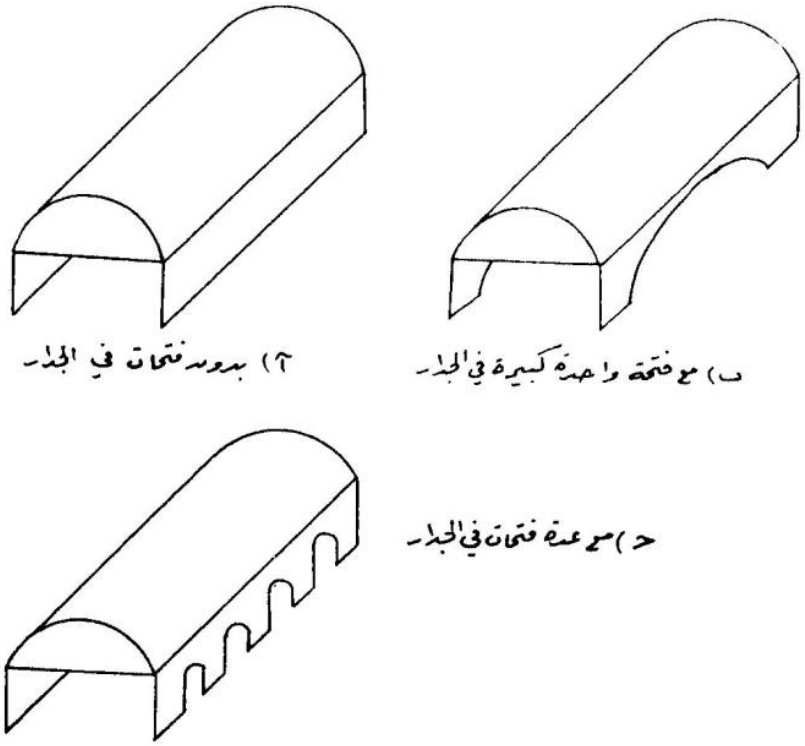
وبالنسبة للجائز الحرفي Edge Beam فيمكن أن يؤخذ شاقولياً أو افقياً، وقد جرت العادة أن يؤخذ شاقولياً في القبوات الطويلة لأن الإجهادات الهامة هي الإجهادات الناتجة عن الاتجاه الطولي (الجائزي)، ويؤخذ افقياً في القبوات القصيرة لأن الاتجاه القبوي القوسي بهذه القبوات يعطي اجهادات كبيرة.

يمكن أن تستند القبوات (في الاتجاه الطولي) مباشرةً على الأساس وبدون حجاب عند الطرف أو حتى قوس عرضي سواء عند الطرف أو في الوسط، وفي هذه الحالة تنقل القبوة الأحمال بشكل عرضي قوسي فقط (انظر الشكل (4 – 17 – أ)). فإذا اخذنا شريحة بعرض متر واحد نجد أن المنشأ أصبح يعمل تماما مثل المنشأ القوسي الخطي الذي سبق دراسته. عند الحاجة لفتحات بالضلع الطويل فيمكن أن يتم ذلك بجعل الحمل ينتقل للأساس عند نقطة ارتكاز محددة، ويكون من الأفضل في مثل هذه الحالات إذا عملنا عصب تقوية على محيط الفتحة الشكل (4 – 17 – ب).

كذلك يمكن أن يكون استناد القبوة الطولي على جدار مباشرة، وفي هذه الحالة يجب تصميم الجدار لتحمل رد الفعل الأفقي في أعلى الجدار الناتج عن تحليل الاتجاه العرضي للقبوة، ويمكن التخلص من رد الفعل الأفقي هذا إذا كان المقطع العرضي للقبوة نصف دائرة أو نصف قطع ناقص لأن حرفه سيكون شاقولياً. وفي حالة الحاجة لتأمين فتحة في الجدار فيمكن تأمين ذلك بعمل الجدار على شكل قوس (ويصمم الجدار كقوس أيضاً)، كما يمكن عمله بشكل أقواس لتأمين عدة فتحات شكل (4 – 18).



الشكل (4 – 17) قبة أسطوانية تستند على الأساس مباشرةً

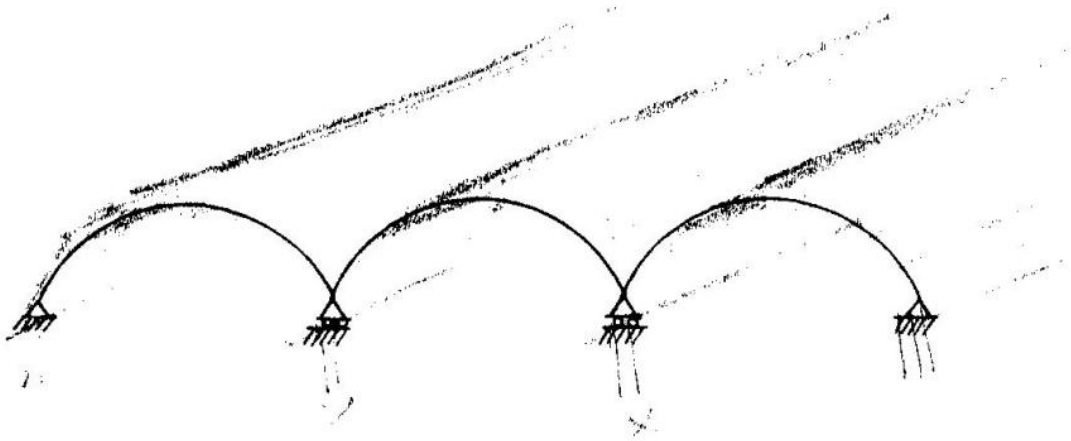


الشكل (4 – 18) قبة أسطوانية تستند طولياً على الجدران

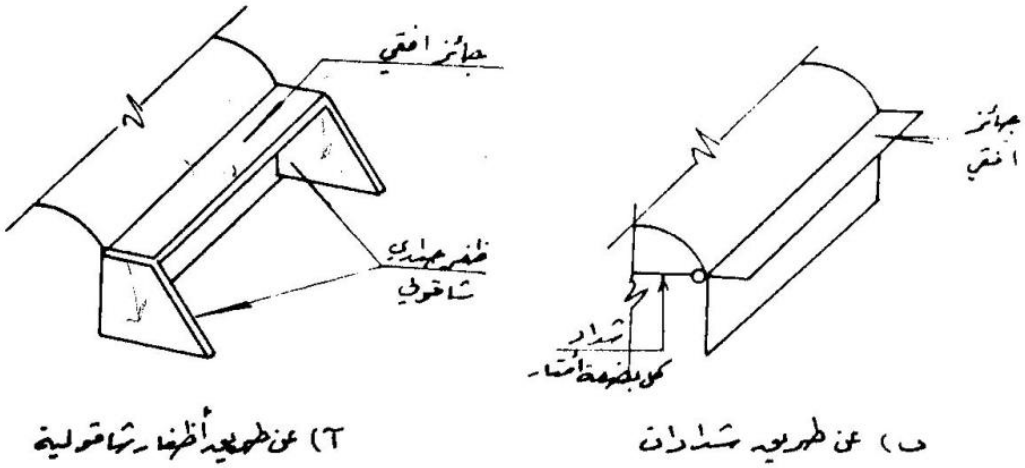
في حالة القبوات متعددة الفتحات، يمكن أن يكون الاستناد في الاتجاه الطولي على الحجابين الطرفيين فقط فنحصل على جيزان بسيطة متجاورة، ويمكن أن يكون الاستناد على الحجابين الطرفيين وعلى أعصاب متوسطة فنحصل على جيزان مستمرة متجاورة. يكون التصميم في الاتجاه العرضي لأقواس متجاورة شكل (4 – 19) أما

في الاتجاه الطولي فيكون التصميم لجائز ذو مقطع عرضي منحني. كذلك يمكن أن يكون الاستناد في الاتجاه الطولي استناداً مستمراً إما على الأساس مباشرةً أو على جدران خارجية فقط أو جدران خارجية وجدران داخلية (عند خط التقاء القبوتين). يجب تصميم الجدران الخارجية على الدفع الأفقي في الأعلى أما الدفع الأفقي في رأس الجدران الداخلية فيكون متوازن تقريباً. يمكن الحصول على جميع الأشكال التي حصلنا عليها في حالة القبوة ذات الفتحة الواحدة.

يمكن مقاومة الدفع الافقي في رأس الجدار عن طرق جائز افقي وأظفار شاقولية كل بضعة أمتار لتحمل رد فعل الجائز الافقي. كذلك يمكن عمل عدة اعمدة مائلة لمقاومة رد الفعل الافقي.

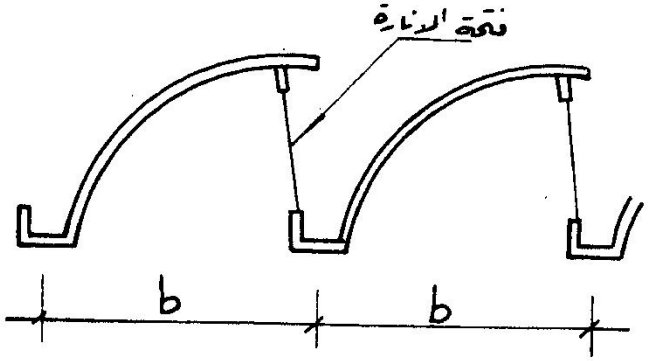


الشكل (4 – 19) مقطع عرضي لعدة قبوات متجاورة



الشكل (4 – 20) مقاومة الدفع الافقي للقبوة برأس الجدار

3-6-2. القشريات الاسطوانية للإضاءة الشمالية: Cylindrical Shells for North Light



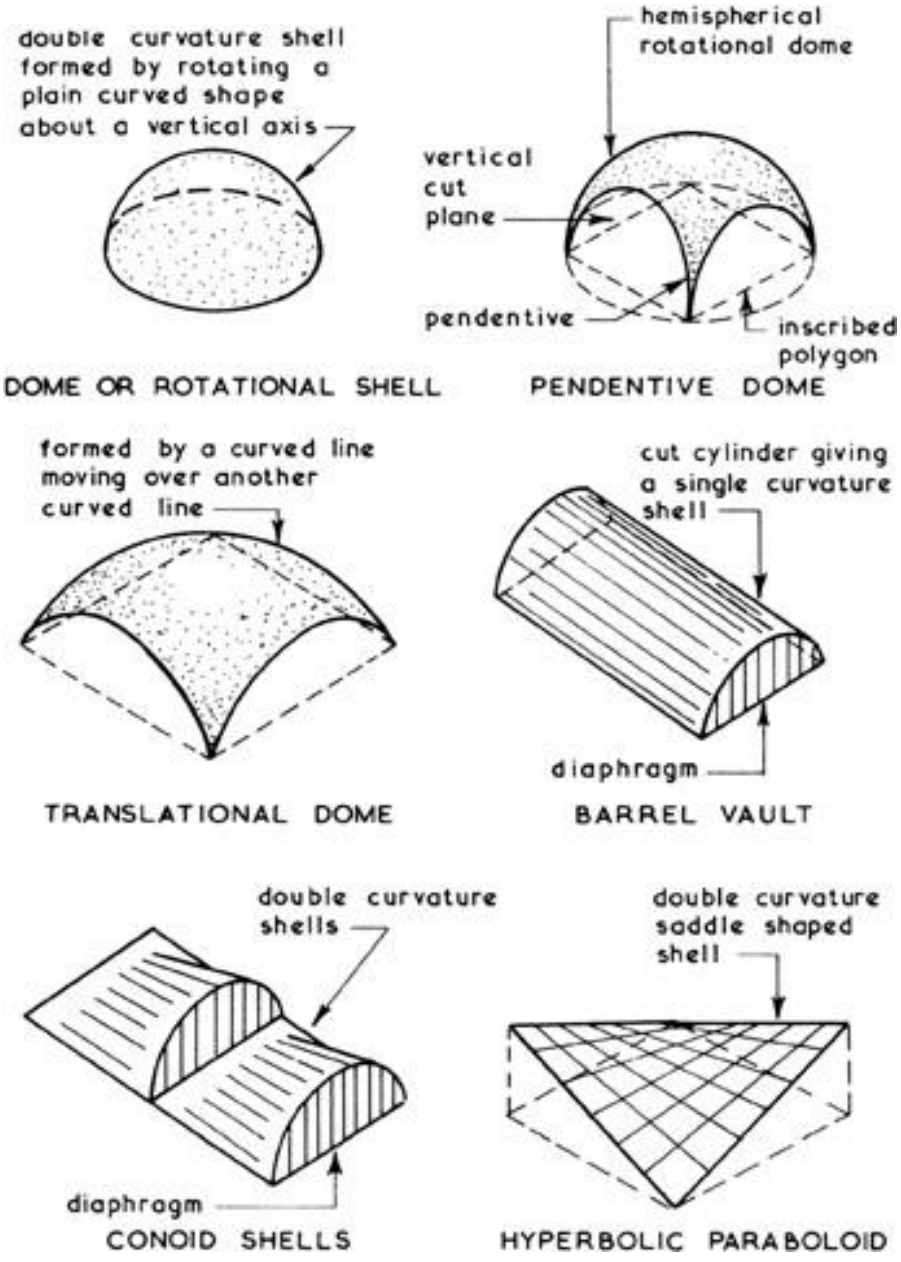
الشكل (4 – 21) مقطع عرضي للقشرية الاسطوانية ذات الاضاءة الشمالية

تستخدم هذه القشريات بكثرة في المصانع عند الحاجة لإضاءة شمالية. يمكن أن تكون فتحة الإنارة مائلة او شاقولية شكل (4 – 21) أما بالنسبة للتصميم، فيجري تصميم هذه القشرية باتجاهين. في الاتجاه العرضي تُصمم كقوس وفي الاتجاه الطولي تُصمم كجائز إذا كانت قشرية طويلة ($L \geq 3b$). أما إذا كانت قصيرة فلها تصميم خاص في الاتجاهين ولا يصح تطبيق نظرية الجائز عليها.

إذا كان المجاز L طويلاً جداً، فيمكن وضع حجاب متوسط أو أكثر (أو عصب أحياناً)، فتعمل القشرية طولياً كجائز مستمر. ويجب التنبيه هنا الى أنه أثناء تصميم القشرية في الاتجاه الطولي كجائز فيجب أن نعتبر المقطع العرضي غير متناظر.

لا بد من وضع حجاب بكل طرف من القشرية، ويكون مهمة هذا الحجاب تلقي رد فعل القشرية في الاتجاه الطولي ونقله للأعمدة. يمكن للحجاب الطرفي أن يكون بشكل جائز عميق مستمر أو مجموعة إطارات ... إلخ، كما سبق الكلام عن ذلك.

7-2. القشريات مزدوجة الانحناء: Shells of Double Curvature



سبق وعرّفنا انحناء غاوس وقلنا عن إمكانية وجود انحناء غاوس صفراً، وذلك في حالة القشريات مفردة الانحناء وسالباً أو موجباً في حالة القشريات مزدوجة الانحناء. إذا اعتبرنا الفروق من الناحية الانشائية بين الأنواع الثلاثة للقشريات، نجد أنه إذا اعتبرنا الفروق من الناحية الانشائية بين الأنواع الثلاثة للقشريات، نجد أنه يمكن تطبيق النظرية الغشائية على معظم سطح القشرية ذات انحناء غاوس موجب، ويكون تأثير حدود القشرية (التي تنتج عزوما في القشرية) متخامداً وبصورة سريعة، بينما يكون التخامد أقل عندما يكون انحناء غاوس صفراً (القشريات مفردة الانحناء)، أما عندما يكون انحناء غاوس سالباً فيكون تخامد العزوم عند أطراف القشرية أقل من النوعين السابقين. ويمتد تأثير حدود القشرية أكثر من النوعين السابقين. اعتماداً على ما سبق فإن السمك اللازم للقشرية مزدوجة الانحناء التي تغطي مساحة محددة تكون في حالة انحناء غاوس موجب أقل منها لقشريات ذات انحناء غاوس سالب، ولكن من جهة أخرى نجد أن القشريات ذات انحناء غاوس موجب لا يمكن أن تشكل من خط مستقيم مما يعني التخفيف في كلفة القالب بكلفة تزيد في كثير من الأحيان عن الكلفة المطلوبة لزيادة المواد.

لمعرفة إمكانيات القشريات مزدوجة الانحناء يمكن أن نذكر أنه عملت قشرية مزدوجة الانحناء ذات أبعاد 30*40 متر وبسمك 7 سم فقط. وسنذكر فيما يلي بعض القشريات الهامة من القشريات مزدوجة الانحناء.

2-7-1. القباب:

تعتبر القباب من القشريات الدورانية ذات الانحناءين في اتجاه واحد وهي من المنشآت المستخدمة منذ القدم كما سبقت الإشارة لذلك.

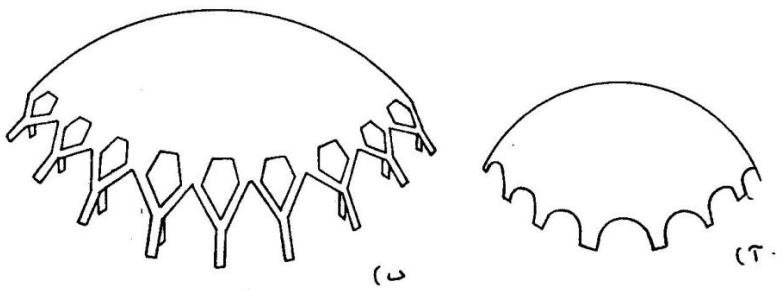
أما بالنسبة لشكل وانحناء القبة فنجد عدة أنواع منها، حسب المنحني الذي شكل بدورانه القبة. فمثلاً هناك القباب الدائرية المتولدة عن دوران قطاع دائري حول محور التناظر الشاقولي، وهناك القباب من قطوع مكافئة دورانية او قطوع ناقصة دورانية.

يجري تصميم القباب باتجاهين، الأفقي الحلقي والشاقولي المولدي. بالاتجاه الأفقي يكون المقطع عبارة عن دائرة بالقباب الثلاث، بينما بالاتجاه المولدي يكون المقطع دائري أو قطع مكافئ أو قطع ناقص حسب نوعية شكل القبة.

يمكن لهذه القشريات أن تغطي مساحة دائرية، حيث تستند أطراف القشرية على جائز حلقي شاقولي ثم على أعمدة وذلك في حالة كون المماس عند الحرف شاقولياً. أما إذا كان المماس عند الحرف مائلاً فيجب وضع جائز حلقي أفقي أو مائل وذلك لمقاومة رد الفعل المائل عند حرف القبة. كذلك يمكن لنفس هذه القباب تغطية مساحة مربعة عن طريق اقتطاع أربعة أجزاء متماثلة من السطح (الزائدة عن المربع المطلوب) ووضع حجاب رابط أو أعصاب متينة في الأمكنة التي اقتطع جزء منها، تكون مهمته نقل قوى القص الى الأعمدة. يمكن وضع فتحة إنارة في أعلى القبة شريطة وضع جائز حلقي متين حول الفتحة للتعويض عن الانقطاع الذي حصل في المادة.

يمكن أن تستند القبة التي تغطي مساحة دائرية على الأساسات مباشرةً مع ترك فتحات للدخول والانارة والتهوية ... إلخ مع تقوية أطراف الفتحات بشكل منتظم (أقواس مثلا كما في الشكل (4 – 22 – أ)) ومن الممكن أيضاً أن تستند القبة على جدار على كامل المحيط أو على جائز حلقي متين على أعمدة شاقولية (اذا كان المماس عند الحرف شاقولياً). كما يمكن أن تستند القبة على أعمدة بشكل حرف Y تكون مائلة ومماسة للقبة عند نقطة الالتقاء معها شكل (4 – 22 – ب).

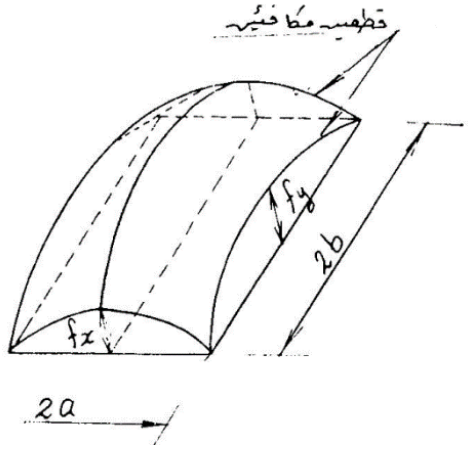
اثناء التحليل الانشائي للاتجاه الحلقي للقباب الدائرية، وُجد أن الجزء من القبة الذي يرى من زاوية مركزية تعمل مع الشاقول أقل من 53 º يكون مشدوداً.



الشكل (4 – 22) قباب ذات فتحات على المحيط

2-7-2. الجسم المكافئ الناقصي: Elliptic Paraboloid

هذا المجسم من القشريات الانتقالية ذات الانحناءين في اتجاه واحد ايضاً. كما يظهر الشكل (4 – 23)، فإن هذا المجسم يتشكل من حركة قطع مكافئ على قطع مكافئ آخر ويكون المقطع الشاقولي في الاتجاهين هو قطع مكافئ بينما يكون المقطع الأفقي هو قطع ناقص ومن هنا جاءت التسمية.

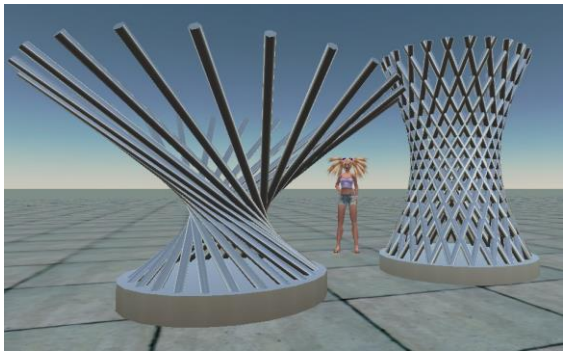


الشكل (4 – 23) تشكيل المجسم المكافئ الناقص

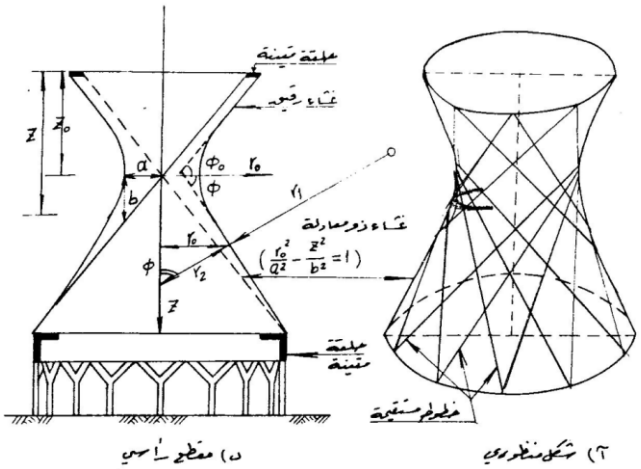
يغطي هذا المجسم مساحة بشكل قطع ناقص أو مستطيل بأبعاد 2b*2a اذا كان a = b يصبح المستطيل مربعاً ويصبح المجسم المكافئ الناقص مجسماً مكافئاً دائرياً، وينتج ذلك عندما يكون القطعين المتكافئين في الاتجاهين متماثلان. والحقيقة أن المجسم المكافئ الدائري هو نفسه القطع المكافئ الدوراني.

عندما يغطي هذا المجسم مساحة مستطيلة، فلا بد من وضع حجاب أو عصب عند كل ضلع من أضلاع المستطيل لنقل الأحمال الى الأعمدة التي تقع عند الزوايا.

2-7-3. المجسم الزائدي الدوراني من قطعة واحدة: Rotational Hyperboloid of One Sheet



يعتبر هذا المجسم قشرية دورانية ذات انحناءين في اتجاهين متعاكسين. ينشأ سطح القشرية من دوران قطعة واحدة من القطع الزائد حول محور التناظر ومن هنا جاء اسم القشرية. كذلك يعتبر سطح هذه القشرية من الأسطح المسطرة إذ أنه يمكن توليده من خط مستقيم. وعند كل نقطة من السطح يمكن ان يمر خطان مستقيمان ولذا يكون السطح مزدوج التسطير.



الشكل (4 – 24) مجسم زائد دوراني

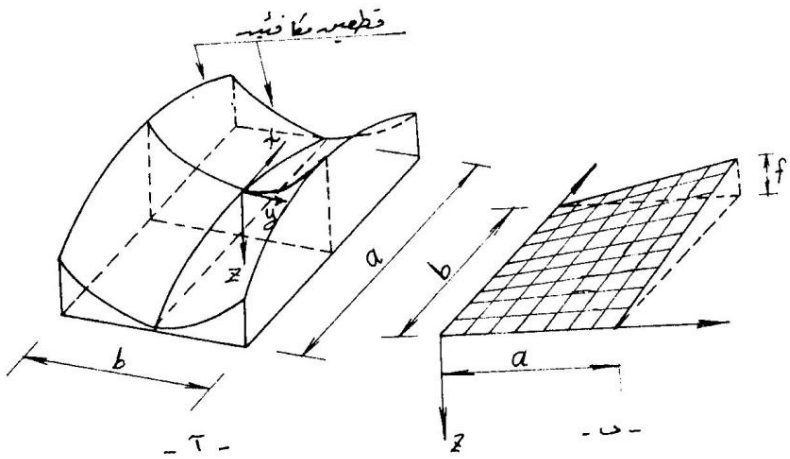
إن كون سطح مسطراً يخفض من كلفة القالب، وهذا ما يفسر سبب انتشار هذه القشرية. إن أكثر استخدام لهذه القشرية هو في خزانات المياه العالية وفي أبراج التبريد لمحطات القوى الحرارية. يتكون السطح الجانبي لهذا المجسم من غشاء رقيق الشكل (4 – 24) ولكن في الأعلى والأسفل يجب وجود حلقة متينة لتتحمل المركبة الافقية للقوة بالغشاء. أما شاقولياً فتحمل القشرية على جائز شاقولي محيطي ثم على أعمدة، ويمكن أن تكون الأعمدة بشكل خط مستقيم أو بشكل حرف Y أو أي شكل آخر من الأشكال التي سبق شرحها.

4-7-2. المجسم المكافئ الزائدي : Hyperbolic Paraboloid

يعتبر الجسم المكافئ الزائدي من القشريات ذات الانحناء في اتجاهين متعاكسين وانتقالية. يتشكل هذا السطح من انتقال قطع مكافئ مقعر لجهة معينة على قطع مكافئ آخر مقعر لجهة معكوسة وهكذا يكون المقطع الشاقولي في الاتجاهين هو قطع مكافئ بينما يكون المقطع الأفقي هو قطع زائد ومن هنا جاءت التسمية.

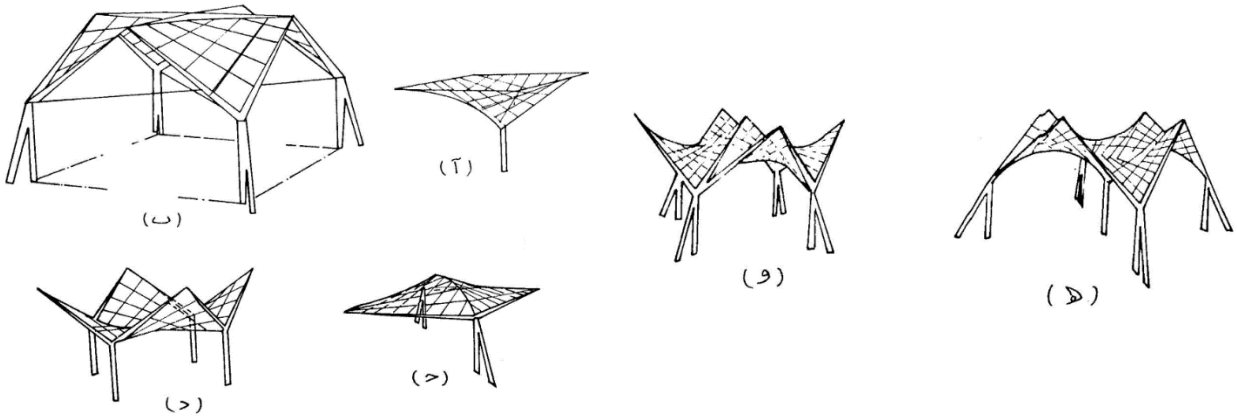
كذلك يعتبر سطح المجسم المكافئ الزائدي سطحاً مسطراً إذ يمكن توليده من خط مستقيم وهو بالحقيقة مزدوج التسطير، إذ يمكن أن يمر خطان مستقيمان من كل نقطة على السطح كما هو واضح بالشكل (4 – 25).

يعتبر المجسم المكافئ الزائدي من القشريات كثيرة الانتشار لسهولة صنع قالب له وكذلك لشكله المميز، ويستخدم في المباني لتغطية صالات واسعة، ولعمل مظلات بشكل خاص. يمكن استخدام سطح واحد من المجسم المكافئ الزائدي لتغطية مساحة معينة (مربعة أو مستطيلة)، ويكون الاستناد على أربعة أعمدة عند الزوايا الأربع أو على عمودين في زاويتين متقابلتين وفي كلتا الحالتين يجب وضع جائز محيطي لنقل الأحمال الى الأعمدة. كذلك يمكن إسناد القشرية بشكل مستمر على جدارين منحنيين بحرفين متقابلين.

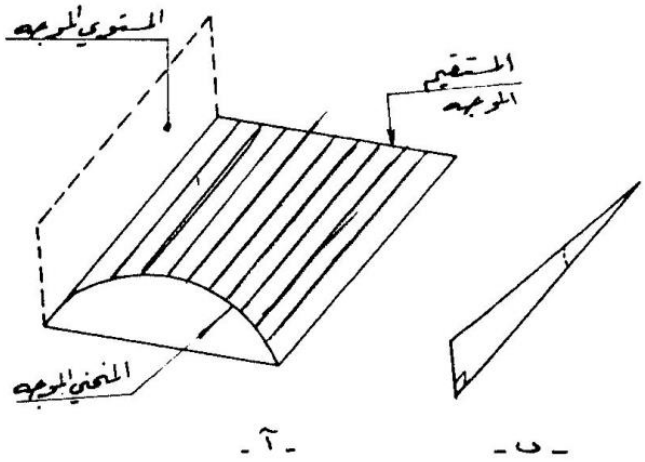


الشكل (4 – 25) تشكيل المجسم المكافئ الزائدي

يمكن تجميع أربعة سطوح لتغطية مساحة معينة (مربعة أو مستطيلة) ويكون الاستناد على أربعة أعمدة أو على عمودين أو حتى عمود واحد، بحيث تكون السطوح على شكل أظفار تعمل على الضغط او على الشد. وفي جميع الأشكال يجب أن يتم وضع جيزان محيطية لكل سطح بحيث تنقل القص لتولده بالنهاية إلى نقطة الاستناد. كذلك يمكن استخدام هذه القشرية للإضاءة الشمالية. يوضح الشكل (4 – 26) تجميعات مختلفة للمجسم المكافئ الزائدي.

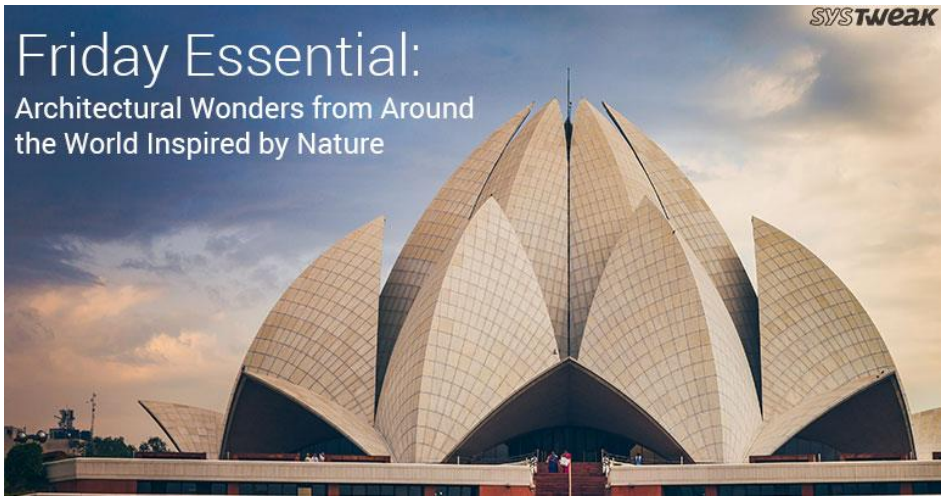


الشكل (4 – 26) تجميعات مختلفة للمجسمات المكافئة الزائدية



الشكل (4 – 27) تشكيل سطح الموشور (المجسم المخروطي)

5-7-2. الموشور (المجسم) المخروطي: Coined



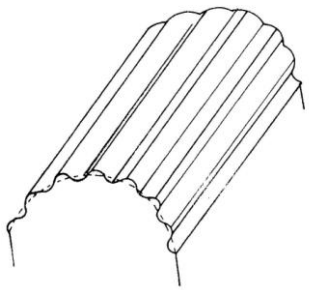
يتكون سطح الموشور المخروطي من انتقال مستقيم على خطين موجهين: الأول هو خط منحني والثاني هو خط مستقيم، وخلال انتقال المستقيم فإنه يبقى موازياً لمستوي يسمى بالمستوي الموجه وهذا المستوي الموجه يجب أن يكون متعامداً مع المستقيم الموجه والمنحني الموجه. اعتماداً على ذلك فإن سطح الموشور المخروطي هو سطح انتقالي ومسطر في نفس الوقت. بالإضافة إلى ذلك فإن الموشور المخروطي هو سطح مزدوج الانحناء وكذلك فإن الانحناءان يكونان في اتجاهين متعاكسين أي أن انحناء غاوس لهذا السطح هو سالب.

تستخدم قشرية الموشور المخروطي بكثرة للأسقف التي تتطلب اضاءة شمالية. كما يستخدم قشرية أخرى مستقلة عن هذه القشرية وهي الموشور جذع المخروطي، حيث يتوقف سطح الموشور المخروطي قبل المستقيم الموجه وبذلك يكون المقطعان منحنيان أنظر الشكل (4 – 27 – ب)

2-8. قشريات خاصة: Special Shells

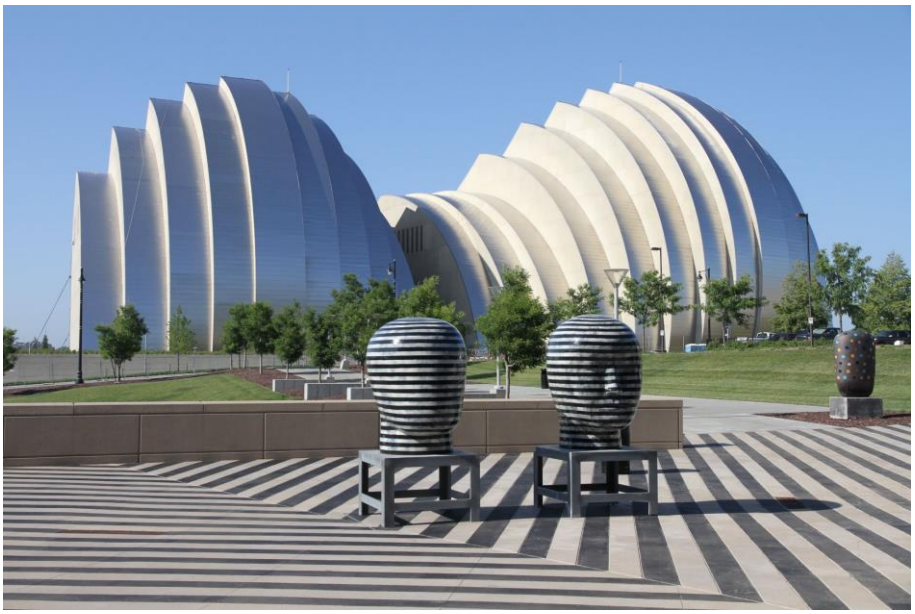
2-8-1. القشرية الاسطوانية المموجة عرضيا:

إن هذه القشرية موضحة بالشكل (4 – 28). وواضح أنها نفس القشرية الأسطوانية الطولية التي تستند على حجابين عند المقطعين المنحنيين، ولكن جرى تموج السطح بحيث يكون منحنياً متعرجاً. إن الفائدة من هذه التموجات هي زيادة عزم العطالة للمقطع موضعياً، مما يجعله أكثر مقاومة للتحنيب الموضعي. لذلك يكون استخدامها مبرراً عندما يكون سطح القشرية رقيقاً، وهناك احتمال حدوث تحنيب موضعي، وتحدث هذه الحالة عند استخدام اللدائن المسلحة كمادة انشاء. بالطبع كلفة القالب عند وجود التموجات أعلى من حالة عدم وجوده، ولكن عند تكرار صناعة القشرية لمرات عديدة باستخدام نفس القالب يصغر الفرق بالتكاليف على القشرية الواحدة.



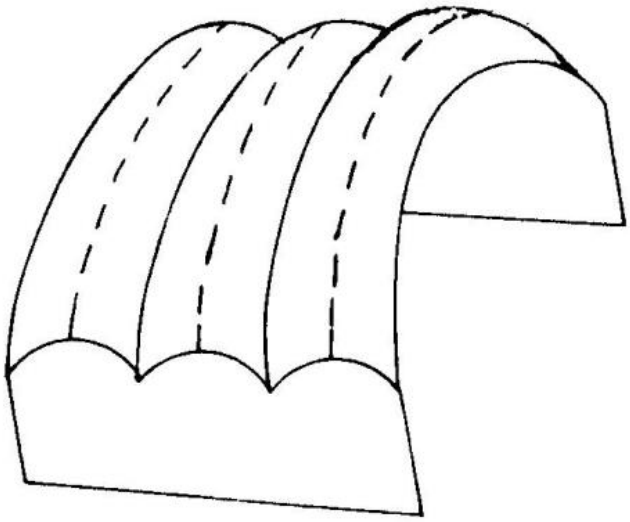
الشكل (4 – 28) قشرية أسطوانية مموجة عرضياً

2-8-2. القبوة السريرية المموجة عرضياً:



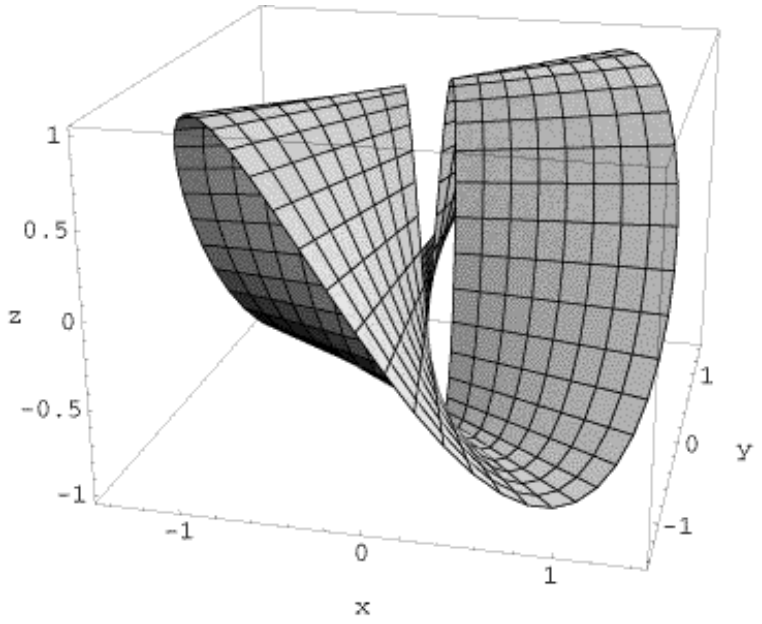
هذه القبوة وهي موضحة بالشكل (4 – 29) هي بالحقيقة نفس القبوة السريرية التي تستند على حرفيها المستقيمين والتي جرت دراستها سابقاً يكون التموج بالمقطع هو بالاتجاه العرضي فقط.

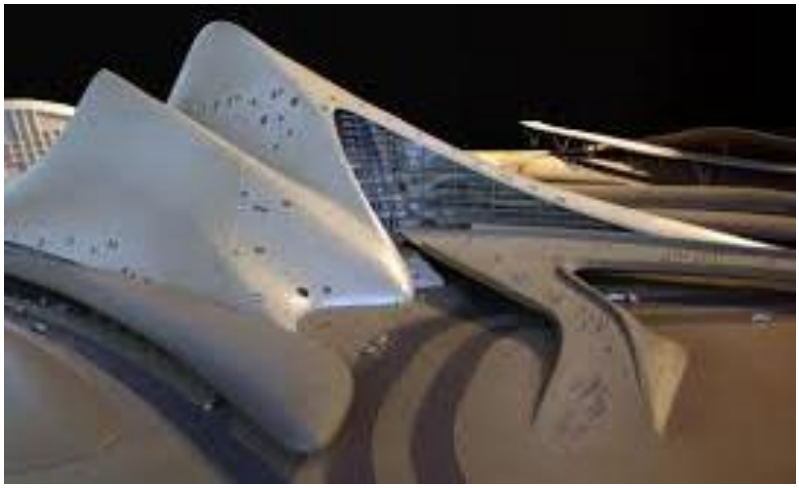
يكون التموج بهذه الحالة هو أيضاً لزيادة مقاومة المقطع للتحنيب الموضعي. كذلك لا تستخدم هذه القشرية إلا عندما تكون السماكة رقيقة جداً، ونخشى من التحنيب الموضعي وذلك لتجنب التكاليف الزائدة للقالب المموج.



الشكل (4 – 29) قبوة سريرية مموجة عرضياً

2-8-3. القشريات الحبلية:

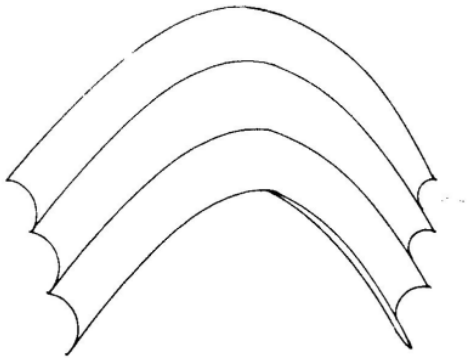




أهم قشرية ممثلة لهذه الفصيلة من القشريات مزدوجة الانحناء هو منحني السلسلة (Catenary) الحبلي. من المعروف أن منحني السلسلة هو الشكل الهندسي الذي يعطي منشأ خالياً من العزوم تماما تحت تأثير وزنه الذاتي (يناظر القطع المكافئ بالنسبة للأحمال الموزعة بانتظام).

بما أن الوزن الذاتي للمنشآت القشرية هو الحمل الرئيسي فإن منحني السلسلة يكون مثالياً للحصول على منشأ خالي من عزوم الانعطاف تحت تأثير وزنه الذاتي. ولكن تحت تأثير الأحمال الأخرى فسيحصل عزوم انعطاف في المنشأ حتماً. ولزيادة عزم العطالة لمقاومة عزوم الانعطاف التي ستنشأ نتيجة الأحمال الإضافية،

فيمكن أن نأخذ المنشأ متموجاً بشكل حبلي كما الشكل (4 – 30) وبهذا المنشأ يكون الانحناء جزئياً باتجاه وجزئيا باتجاهين.



الشكل (4 – 30) قشرية السلسلة الحبلية

4-8-2. قشريات خاصة أخرى:

جرى فيما سبق استعراض معظم القشريات المستخدمة عادةً في مجال المباني، ولكن هناك مجالات خاصة أخرى تستخدم فيها القشريات مثل : الخزانات (مياه – وقود – غاز ...إلخ) والصوامع وبعض المنشآت الخاصة الأخرى. ومن القشريات المستخدمة في هذه المجالات، يمكن أن نذكر المخروط والأسطوانة الكاملة (وخاصة الأسطوانة الدائرية) والقبة وكذلك خزانات من قشريات على شكل قطرة ماء. كذلك يجري أحياناً استخدام قشرية بشكل كرة كاملة وهذه تستخدم كخزان غاز عندما يطلب أن يكون سطح الغاز المعرض للجو الخارجي أصغر ما

يمكن لأنه من المعروف أن نسبة السطح الخارجي للحجم تكون أصغر ما يمكن في حالة الكرة. وتجدر الإشارة هنا الى أن الضغط في حالة الخزانات والصوامع يكون من الداخل للخارج وبالتالي يتعرض سطح القشرية إلى إجهادات شادة في معظم الحالات.

2-9. قشريات فراغية:

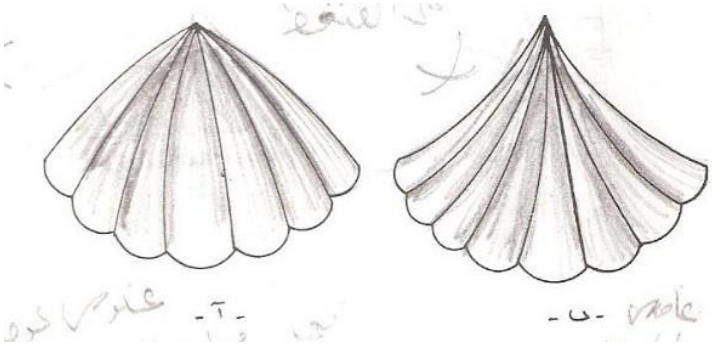
إذا كانت السطوح الملتقية في الفراغ هي سطوح منحنية نحصل على منشآت فراغية من سطوح منحنية أو يمكن أن نسميها قشريات فراغية لقد سبق دراسة بعض هذه المنشآت عند دراسة القشريات ونذكر هذه المنشآت التشكيلات المختلفة لأربعة قطوع مكافئة زائدية والقبوة السريرية المموجة وقشرية السلسلة الحبلية وسندرس فيما يلي بعض القشريات التي يمكن أن تندمج تحت هذا العنوان.

المنشآت الفراغية من سطوح منحنية: Space structures from curved surfaces

أذا كانت السطوح الملتقية في الفراغ هي سطوح منحنية نحصل على منشآت فراغية من سطوح منحنية أو يمكن أن نسميها قشريات فراغية، لقد سبق دراسة بعض هذه المنشآت عند دراسة القشريات ونذكر من هذه المنشآت التشكيلات المختلفة لأربعة قطوع مكافئة زائدية والقبوة السريرية المموجة وقشرية السلسلة الحبلية وسندرس فيما يلي بعض القشريات التي يمكن أن تندمج تحت هذا العنوان.

2-9-1. القباب المموجة: Corrugated domes

يمكن أن تكون القباب مموجة مع انحناء غاوس موجب شكل (أ-46) أو مع انحناء غاوس سالب شكل (ب-46)، والفرق بين القشرتين من الناحية الإنشائية أن الأولى تعمل مولد على الضغط بينما تعمل الثانية مولد على الشد وتتفق القشريتان بأن كلاهما يعملان محيطيا على الضغط أن فائدة التموجات إنشائيا هو زيادة مقاومة المقطع للتحنيب الموضعي.



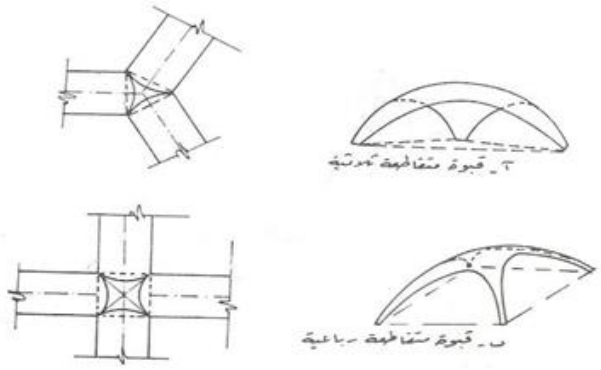
شكل (46)

2-9-2. القبة الحبلية: funicular dome

يكون انحاء غاوس لهذه القبة موجبا ويكون الانحناءان معاكسان للانحناءين في حالة القبة الموجبة مع انحناء غاوس موجب (قارن الشكل19) مع الشكل (37) تعمل هذه القبة على الشد بالاتجاهين يمكن أن يكون الاستناد مستمرا على كامل المحيط او مركزا على أعمدة عند نقطة التقاء المنحنين مع أعصاب قوسية بين الأعمدة أو يمكن أن تستند الحروف الخارجية على حجاب دائري ويستند الحجاب الدائري على أعمدة.

3-9-2. القبوات المتقاطعة: groined vaults

من أهم هذه القبوات المتقاطعة نذكر القبوة المتقاطعة الثلاثية المشكلة من تقاطع ثلاث قبوات أسطوانية (شكل 24) والقبوة المتقاطعة الرباعية المشكلة من تقاطع أربع قبوات أسطوانية (شكل 47)



شكل (47) قنوات متقاطعة

2-9-4. الصدفة: shell

تعتبر قشرية الصدفة (شكل 48) من القشريات الفراغية الهامة والصدفة تشبه القبوة السريرية المموجة عرضيا مع فرق أن الصدفة لا تغطي مساحة مستطيلة كالسابقة وإنما تغطي مساحة مثلثية تقريباً.

شكل (48) قشرية الصدفة