

دراسة مقارنة بين استخدام النظرية الغشائية ونظرية العناصر المحددة المختلطة لإيجاد الإجهادات بمنطقة الارتكاز بالخرانات الكروية المرفوعة

أ / محمود مصطفى سعد أشطبية

كلية الهندسة صبراتة. جامعة صبراتة

shteba@yahoo.com

الملخص

يهدف هذا البحث لإيجاد الإجهادات في منطقة الارتكاز لخرانات السوائل الكروية العلوية المستندة على أعمدة ذات السمك الثابت تحت تأثير الحمل الهيدروستاتيكي للسائل التي تمثل حالة التماثل حول المحور، وذلك باستخدام النظرية الغشائية في إيجاد القوى المحورية الرأسية والقوى المحورية المحيطة، ونظراً للقصور الذي يعتلي النظرية الغشائية من انقطاع في القوى نتيجة لعدم احتسابه عزوم الانحناء في منطقة الارتكاز، وللحصول على نتائج أكثر دقة تم استخدام الطرق العددية والاتجاه إلى الطريقة الأكثر ملاءمة لتحليل القشريات الدورانية، وهي طريقة العناصر المحددة المختلطة التي تعتبر امتداد لطرق المصفوفات في التحليل الإنشائي حيث تختص في تحليل القشريات الدورانية تحت تأثير الأحمال الثابتة والمتحركة، وذلك باستخدام عدد مناسب من العناصر الحلقية الدائرية المنحنية. تم دراسة ومقارنة النتائج المتحصل عليها من النظرية الغشائية، ونظرية العناصر المحددة المختلطة، وقد تم الحصول على نتائج جيدة باستخدام عدد مناسب من العناصر، وكانت نتائج نظرية العناصر المحددة المختلطة أكثر دقة مع تغطية القصور في النظرية الغشائية بحصولنا على كافة المجاهيل من قوى محورية وقوى محيطية وعزوم وإزاحات لتحديد المنطقة الآمنة للتثبيت (منطقة اتصال الأعمدة بالخران).

الكلمات الرئيسية: خرنات السوائل الكروية؛ النظرية الغشائية؛ العناصر المحددة المختلطة.

Abstract

This research aimed to find out the stresses in the fulcrum area of the upper spherical fluid tanks that are based on columns of fixed thickness under the influence of the hydrostatic load of the liquid, which represents the state of symmetry around the axis.

Membrane theory was used to find out the vertical axial forces and the circumferential axial forces. However, membrane theory cannot calculate the bending moments in the fulcrum area, which is considered a shortcoming in this situation. To obtain accurate results and account for the inability of membrane theory, mixed finite element method has been used. This method is an extension of the matrix methods in the structural analysis and is used to analyze the shells when subjected to stable and moving loads by using an appropriate number of curved circular elements.

The results, obtained from the membrane theory and the mixed finite element theory, have been compared. The results of the mixed finite element theory were more accurate and accounted for the shortcomings of the membrane theory and helped the researcher to get the axial forces, circumferential forces, moments and displacements, which are needed to determine the safe installation area (columns connection area with the tank).

المقدمة

تمتاز القشريات بالشكل المعماري والمظهر الداخلي والخارجي الجميل وغالبا ما يلجأ إليها لتغطية القاعات والصالات ذات المساحة الكبيرة، وفائدة القشريات من الناحية الاقتصادية تتمثل في استخدامها لمواد أقل مقارنة مع استخدام أنظمة البناء التقليدية الأخرى بسبب قلة سمكها وقد استخدمت القشريات أسقفا وخزانات أرضية وخزانات مرفوعة وغلايات وأبراج تخزين وغيرها.

وتعرف القشريات الرقيقة بأنها بلاطات منحنية أو مطوية لها سمك صغير نسبيا مقارنة بأبعادها الأخرى، وقد قام العديد من العلماء والباحث والمؤلفين بوضع حدود يمكن منها تصنيف القشريات حسب سماكتها، وتكون هذه المقادير هي الفيصل بين القشريات الرقيقة والسميكة.

نذكر منها العلاقة التالية:

$$\left(\frac{1}{1000} < t/Rm < \frac{1}{50} \right)$$

حيث (t) سمك القشرية و (Rm) هي نصف القطر الأصغر للانحاء من المنحنى الوسطي للقشرية وتمثل المعادلة السابقة إحدى طرق تصنيف القشريات الرقيقة (THIN SHELLS) (Flugge W.).

إن سلوك العديد من القشريات الرقيقة يكون مزيجا من سلوك القوس في المستويات المختلفة، فالأحمال الطبيعية تنقل مباشرة إلى الركائز بواسطة أحمال محورية أو عن طريق عمل الكمرات حيث الأحمال المنقولة بواسطة قوى الضغط والشد والقص تكون في مستوى السطح الأوسط (Middle Surface)

وهناك عزوم وقوى قص مماسية عند حدود القشرية حيث تصل للقشرية سواء أكانت مرتكزة على مفصل في حافة عنصر أو متصلة مع قشرية أخرى (SHTEBA, 2013).

معظم القشريات الرقيقة تستطيع مقاومة مجموعة متنوعة من الأحمال بواسطة قوى في المستوى ويمكن تحليلها فقط عندما تكون الأحمال منتظمة التوزيع وتسمى هذه الطريقة بالنظرية الغشائية، أما في نظام المساند عند حدوث قوى ارتكاز كبيرة وقوة عزم انحناء محلية كبيرة فإنه يتم مقاومتها بإضافة بعض المقويات علي القشرية وربما استخدام نظريات أخرى تختص بحساب عزوم الانحناء للقشريات.

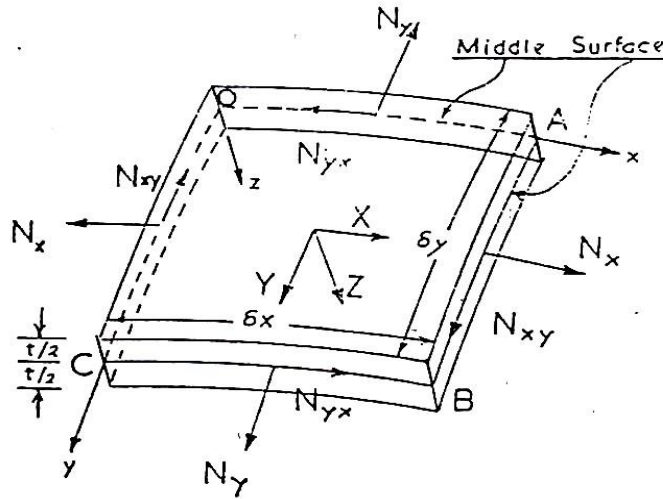
نظرية القشريات الرقيقة (النظرية الغشائية) Membrane Theory

نظرية المرونة للقشريات الرقيقة (elastic theory) صاغها العالم Love عام 1885م وقد استمرت دراسة هذه النظرية بواسطة العديد من الباحثين مثل TIMOSHENKO & WANG.

محصلة الإجهادات الغشائية

ينشأ نتيجة تأثير قوة خارجية على القشرية نوعان من ردود الفعل هما سلوك الغشاء وسلوك الانحناء ويكون رد فعل الغشاء بفرض أن القشرية غير قادرة على مقاومة أي عزوم انحناء، وأن القوة والأحمال الخارجية تقاوم بواسطة قوة داخلية تحدث في سطح القشرية فقط.

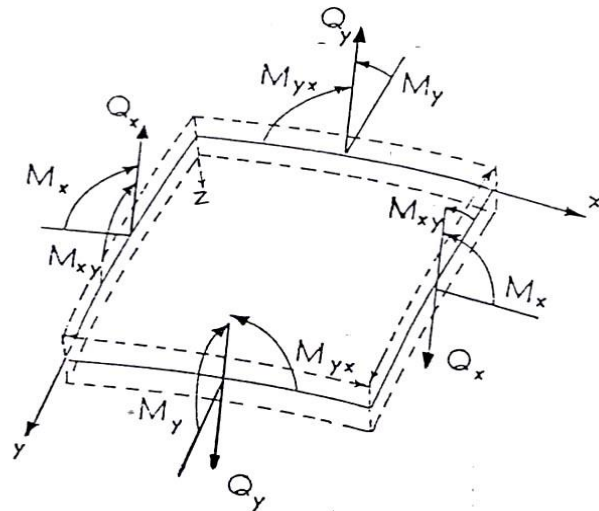
إن القوة المسلطة على جانب العنصر الغشائي تعرف بالأحمال أو القوة لكل وحد طول من الجانب أو الوجه الجانبي وهذه تكون عبارة عن محصلة الإجهادات كما هو موضح في الشكل (1) تكون محصلة الإجهادات الغشائية مسلطة على أوجه العنصر (δ_x, δ_y) .



شكل (1): الإجهادات المتولدة في العنصر الغشائي.

محصلة إجهادات الانحناء

إن محصلة الإجهادات الغشائية تكون غير كافية للتنبؤ بحقيقة السلوك المرن للعنصر الغشائي؛ لذا فالأحمال الخارجية ستعطي ازديادا في الانثناء والانحناء على القشرية، وهذا الانحناء الحادث يتم مقاومته بواسطة عزوم وقوى داخلية في القشرية كما مبين في الشكل (2).



شكل (2): يوضح محصلة إجهادات الانثناء بالقشرية.

تطبيق النظرية الغشائية على خزانات السوائل المرفوعة (الخزانات المعلقة)

الخزانات المرفوعة فوق سطح الأرض والمستندة على أعمدة لها أشكال عدة من الناحية الهندسية والإنشائية مثل الخزانات الاسطوانية الدائرية والخزانات المخروطية الدائرية وخزان إنتز والخزانات الكروية حيث تتشابه في الأغراض إلى حد كبير وهو احتواء السوائل والغازات المسالة ويكون المسئول المباشر على الأحمال هو توازن السائل داخل الخزان و ضغطه الهيدروستاتيكي.

الإجهادات في الخزانات ثابتة السماكة ذات الكمرة الدائرية

الطرق التقليدية المألوفة لتثبيت الخزانات الكروية المرفوعة تتم بوضع كمرة دائرية صلبة على مجموعة من الأعمدة الرأسية متمائلة التوزيع ويقودنا موقع هذه الكمرة الدائرية إلى معرفة قيمة اضطراب الإجهادات والانحناءات في منطقة جوار الكمرة والتي قد تكون مرتفعة أكثر من أقصى قيمتها في الإجهادات الغشائية بالخزان، ومثل هذه الحالات تحدث أعلى وأسفل خط الارتكاز وخاصةً عندما يكون مستوى الارتكاز يقترب من حدود ($\sigma_s = 120$) أو في حال ما كانت حدود صلابة الكمرة الدائرية ليست عالية بما فيه الكفاية (Shteba, 2013) هذه الحالة من الارتفاع المفرط في منطقة الإجهادات من القشرية يمكننا تجنبها بوضع كمرة الارتكاز اقرب ما يكون من منتصف الخزان قدر الإمكان وفي حالة تعذر تغيير موضع الارتكاز علينا التأكد من الصلابة العالية للكمرة الدائرية.

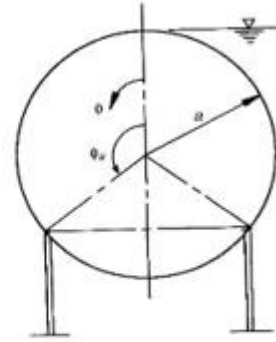
ولاستكمال الدراسة لأنواع الارتكاز أو التحميل في الخزانات الكروية المرفوعة ذات الإزاحات القليلة يكون الحل في زيادة الإجهادات في منطقة التقاء الأعمدة بالقشرية هي زيادة سماكة منطقة الارتكاز والمنطقة المجاورة لها لمكافحة هذه الإجهادات .

في خزانات الضغط التي تحوي الغازات المسالة يتم حفظها تحت ضغط عالٍ، وبالمثل فإن الخزانات الكروية من ذات النوع تكون عبارة عن خزان كروي معدني مملوء بسائل أو غاز مسال وبكثافة (γ) لكل وحدة حجم يسبب ضغط هيدروستاتيكي داخل الخزان.

الخزانات الكروية (Spherical tanks)

تعتبر عملية تطبيق النظريتين الغشائية (Membrane Theory) والعناصر المحددة المختلطة (Mixed Finite Element) على الخزانات الكروية المرفوعة الحاملة للسوائل والغازات المسالة

موضوع هذه الدراسة حيث سيتم فيه إيجاد القوى المتولدة في القشرية واستخدام طريقة زيادة السمك عند منطقة التثبيت لنقل حمل الخزان إلى الأعمدة ومقارنة الإجهادات المتحصل عليها بالطريقتين للحصول على المنطقة المناسبة للاتصال بين الخزان والأعمدة (Shteba, 2013).



شكل (3): يبين الخزان الكروي ذو الكمره الدائرية.

حيث أن $a = r_1 = r_2$ ، $P_\phi = P_\theta = 0$ ، $P_r = \gamma a(1 - \cos \phi)$ (1)

في الجزء العلوي من الخزان ($0 \leq \phi \leq \phi_s$) حيث ϕ_s هي قيمة ϕ عند منطقة دائرة ارتكاز الأعمدة على الكمره الدائرية و بفرض توفر التماثل لردود الأفعال التي تسد الفراغات المتمثلة في الأعمدة الرأسية بشرط صلابة الكمره الدائرية (Timoshenko, 1959).

$$(2) \dots\dots\dots N_\phi = \frac{\gamma a^2}{6} \left(\frac{1 - \cos \phi}{1 + \cos \phi} \right) (1 + 2 \cos \phi)$$

$$(3) \dots\dots\dots N_\theta = \frac{\gamma a^2}{6} \left(\frac{1 - \cos \phi}{1 + \cos \phi} \right) (5 + 4 \cos \phi)$$

أما القوة المحورية في الجزء السفلي من الخزان تكون $\phi_s \leq \phi \leq \pi$ وقيمة N_ϕ سوف تكون صغيرة جداً في نهاية الخزان من الأسفل لأن $\phi \equiv \pi$.

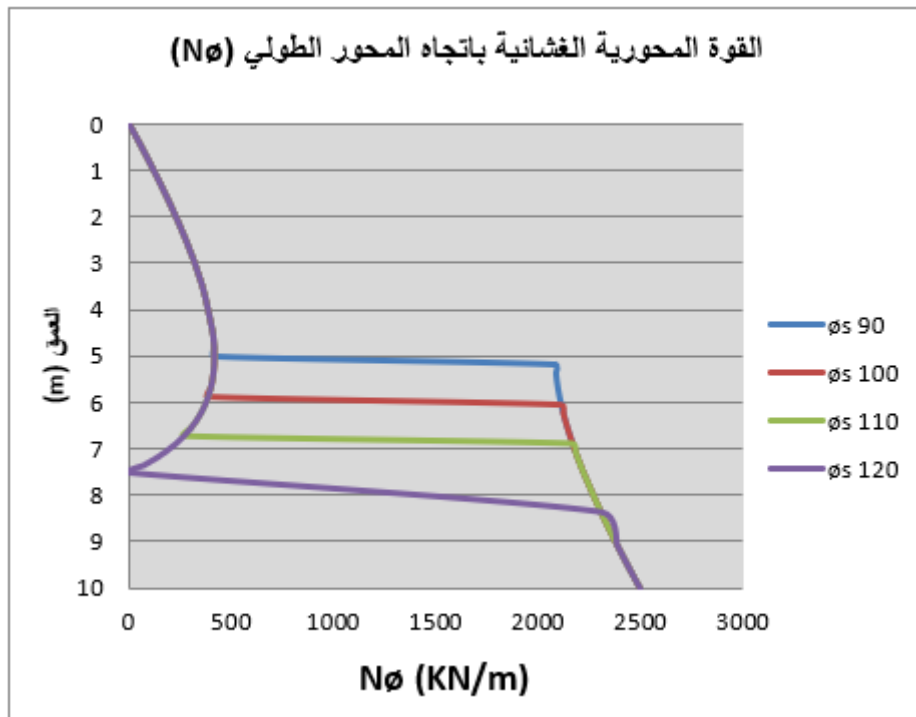
$$(4) \dots\dots\dots N_\phi = \frac{\gamma a^2}{6} \left(\frac{5 - 5 \cos \phi + 2 \cos^2 \phi}{1 - \cos \phi} \right)$$

$$(5) \dots\dots\dots N_{\theta} = \frac{\gamma a^2}{6} \left(\frac{1 - 7 \cos \phi + 4 \cos^2 \phi}{1 - \cos \phi} \right)$$

نتائج تطبيق النظرية الغشائية على خزانات السوائل المرفوعة (الخزانات المعلقة)

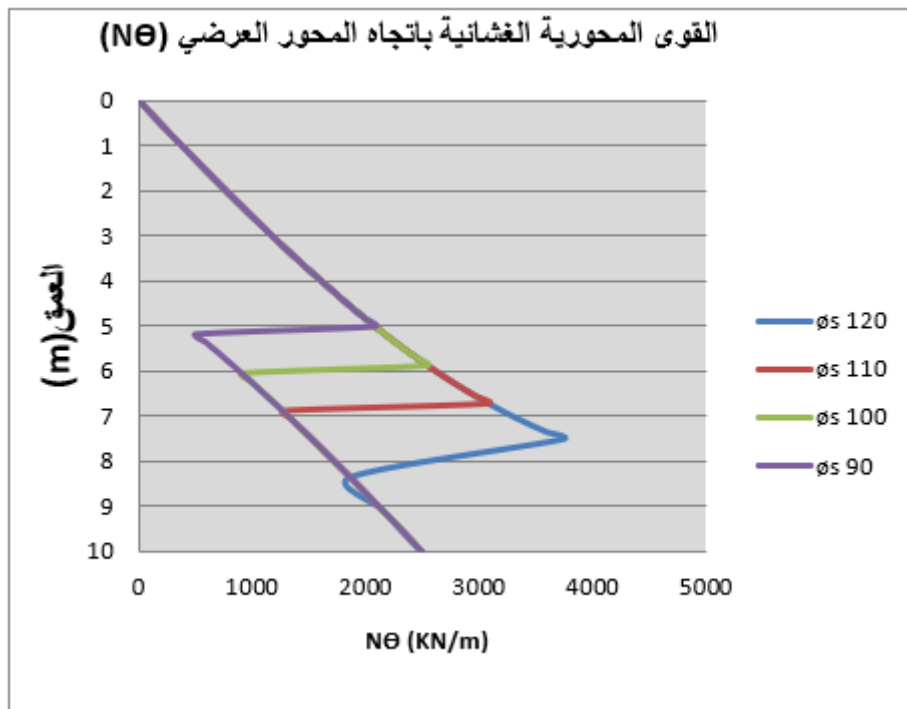
الخزان الكروي ذو الكمرات الدائرية مملوء بالسائل أي أنه تحت تأثير كثافة السائل فقط دون وجود ضغط إضافي داخلي منتظم، و باستخدام المعادلات (2,3,4,5) حصلنا على توزيع القوى المحورية في جسم الخزان لزوايا ارتكاز مختلفة (Shteba, 2013).

حيث تم استخدام نموذج لخزان ذو نصف قطر $a=5$ متر، وكثافة السائل $\gamma = 100 \text{KN/m}^3$ وتم تقسيم النقاط على الخزان بشكل يتلاءم وعدد العقد في حالة تقسيم الخزان باستخدام طريقة العناصر المحددة المختلطة لسهولة مقارنة النتائج، وكانت قيمة القوة المحورية الراسية $N_{\theta}(\text{KN/m})$ للعديد من النقاط على الخزان مرتبطة بالعقد ليسهل مقارنتها بنتائج بنظرية العناصر المحددة المختلطة وتم اختبار أربعة زوايا ارتكاز (120,110,100,90) وكانت النتائج كما هي مبينة بالمخطط البياني التالي بالشكل (4).



شكل (4): يبين القوة المحورية N_{θ} في حالة زوايا ارتكاز (90,100,110,120).

ونلاحظ من خلال الشكل (4) قيمة القوة المحورية N_{θ} في حالة نقاط لزوايا ارتكاز مختلفة (90،100،110،120) و يوضح بان القوة المسلطة على الكمره الدائرية تقل بزيادة قيمة زاوية الارتكاز حتى تساوي قيمته الصفر في حالة ما تكون زاوية الارتكاز $\phi_0 = 120$ وتكون القيم العليا للإجهادات كما أعلاه، أما قيمة القوة المحيطة المحورية N_{θ} (kn/m) في حالة زوايا الارتكاز نفسها (120،110،100،90) فكانت كما هي مبينة بالشكل البياني (5).



شكل (5): يبين القوة المحورية N_{θ} في حالة زوايا ارتكاز (90،100،110،120).

ونلاحظ من خلال الشكل (5) قيمة القوة المحورية N_{θ} في حالة نقاط ارتكاز مختلفة (90،100،110،120) حيث يوضح بأن القوة المسلطة أعلى الكمره الدائرية تزيد بزيادة قيمة زاوية الارتكاز ثم يقل في نقاط الارتكاز ويعود للارتفاع بعد الارتكاز.

ومن النتائج السابقة تبين عدم استمرارية القوة المحورية الرأسية في حالة زاوية الارتكاز $\phi_0 = 120$ وحيث إن النظرية الغشائية لا تفي بشروط الاستمرارية في حالة بعض نقاط الارتكاز عليه يجب حساب عزوم الانحناء الناتجة في منطقة الارتكاز والمنطقة القريبة منها [2Timoshenko].

طريقة العناصر المحددة المختلطة (Mixed Finite Element Method)

تعتبر هذه الطريقة من طرق التحليل العددي الرئيسية و تمثل امتدادا لطرق المصفوفات في التحليل الإنشائي حيث ساهم في وضع أسس التحليل الإنشائي باستخدام طرق المصفوفات التي تطورت لتشمل حل للمنشآت المستمرة.

المعادلة الآتية تعطي تغير الدوال المختلطة للمنشآت حيث تم تطويرها للاستخدام في تحليل القشريات كان في البداية بواسطة (Barony, 1977).

$$(6) \dots\dots\dots \pi = \int_{S_0}^{S_1} (W_{u\epsilon} - W_{\sigma M} - W_{\sigma S} + W_{\gamma S} + W_u) r ds + r \psi \Big|_{S_0}^{S_1}$$

ويتم في نظرية العناصر المحددة المختلطة تقسيم القشرية إلي مجموعة من العناصر كما مبين في الشكل (1)، أما الشكل (2) يوضح مكونات إزاحة العناصر العقدية (u, w) والشاملة (u_r, u_z) حيث من أساسيات الطاقة الكامنة الدنيا الدالة π صهرت في حدود الإزاحات بينما الدالة π الطاقة التكميلية صهرت في الإجهادات.

مبدأ الخلط أو أساس نظرية العناصر المختلطة هي الدالة التي ضمت كلاً من الإزاحات والإجهادات ويسمى هذا مبدأ (Razneer-Helenger)، هذا المبدأ يمكن اشتقاقه من أساسيات الطاقة الكامنة أو أساسيات الطاقة التكميلية وبواسطة تطبيق شروط التقييد المناسبة و بالاعتماد على مبدأ (Razneer-Helenger) الخاص باستنتاج العناصر المختلطة للقشريات الدورانية باستخدام العنصر الحلقي المنحني والذي يأخذ في الاعتبار دالتي الإزاحة والإجهادات التي تعتبر ساكنة واشتقاقها يؤول إلى الصفر.

$$(7) \dots\dots\dots \delta I_R = 0$$

ويتطبق هذه القاعدة على الجزء الحلقي من القشريات الدورانية.

$$(8) \dots \cdot I_R = \int_{s_0}^{s_1} \int_0^{2\pi} [W_{u\epsilon} - W_{\sigma M} - W_{\sigma Q} + Q_\phi (\gamma_\phi - \beta_\phi) + Q_\theta (\gamma_\theta - \beta_\theta) + W_{uP}] r ds d\theta + r \psi (\bar{u}, \bar{M}) \Big|_{s_0}^{s_1}$$

كثافة طاقة الانفعال = Wuε = الطاقة المكملة لإجهادات الازدواج.

$W_{\sigma Q}$ = الطاقة المكتملة لانفعال القص $W_{\tau Q}$ = الشغل المبذول لقوة القص.

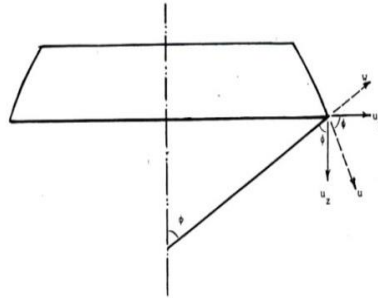
W_{up} = الشغل المبذول للأحمال المؤثرة Ψ = دالة الشروط الحدية.

ومن هنا يتضح بأن طريقة العناصر المختلطة هي خلط في المجاهيل بين الإجهادات (القوى) والإزاحات وذلك حسب المسألة، ويتم إيجاد قيم هذه الإجهادات مباشرةً وهذا يعزي دقة هذه الطريقة ومن ناحية أخرى استحداث العناصر بالطريقة المختلطة هو الأكثر تعقيداً ففي الطريقة المختلطة يتم التعامل مع الإزاحات والقوى الداخلية في آن واحد كمجاهيل أساسية في المسألة (Barony, 1977).

الشكل الهندسي للعنصر الحلقي

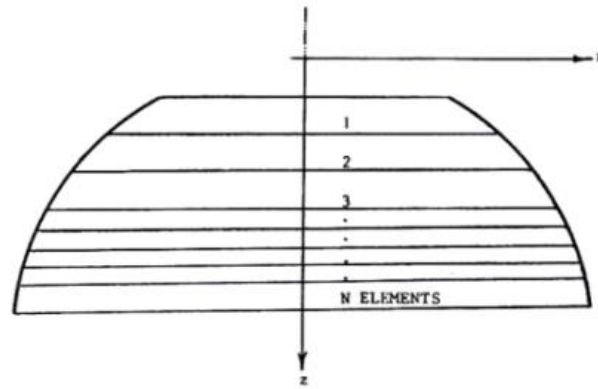
الخطوة الأولى في نظرية العناصر المحددة المختلطة بعد قرار العمل بها هي تقسيم الشكل الهندسي إلى أشكال ملائمة وعدد مناسب من العناصر (Kabazi, 1995).

الأشكال (6)، (7)، (8) تبين العناصر الحلقيّة وطريقة تقسيمها وإحداثياتها على القشريات الدورانية على هيئة جزء قطع ناقص من القشرية كما مبيّنه بالشكل:

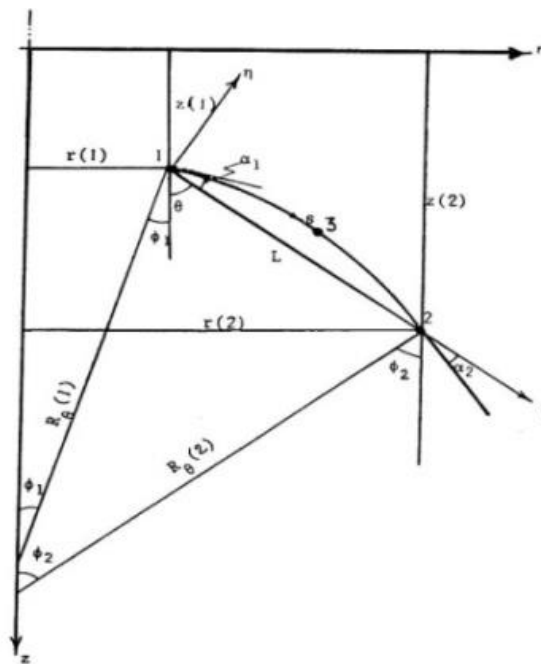


شكل (6): يوضح شكل العنصر القشري الدوراني على هيئة قطع ناقص.

حيث تحتاج إلى عدد مناسب من العناصر للحصول على دقة عالية في ربط المصفوفة الهيكلية المطلوبة وهذه النظرية تشمل استبدال أو تقسيم القشرية لمجموعة من العناصر كما مبيّن بالشكلين (7) و(8).



شكل (7): يوضح شكل العنصر وطريقة تقسيم القشرية لمجموعة عناصر.



شكل (8): يبين المنحنى الطولي للجزء المقطوع من القشرية.

إيجاد القوة المحورية وعزوم الانحناء في الخزانات الكروية المعلقة باستخدام نظرية العناصر المحددة المختلطة

نظرية العناصر المحددة المختلطة تم تطويرها لتطبق على أشكال متعددة وحالات مختلفة من القشريات الدورانية باستخدام عقدتين و ثلاث عقد مع تحليل للأحمال المتناظرة وغير المتناظرة والتحليل الخطي وغير الخطي، المصدر (Barony, 1977) يحتوي كافة تفاصيل نظرية العناصر المحددة المختلطة وبعض استخداماتها في حل القشريات الدورانية.

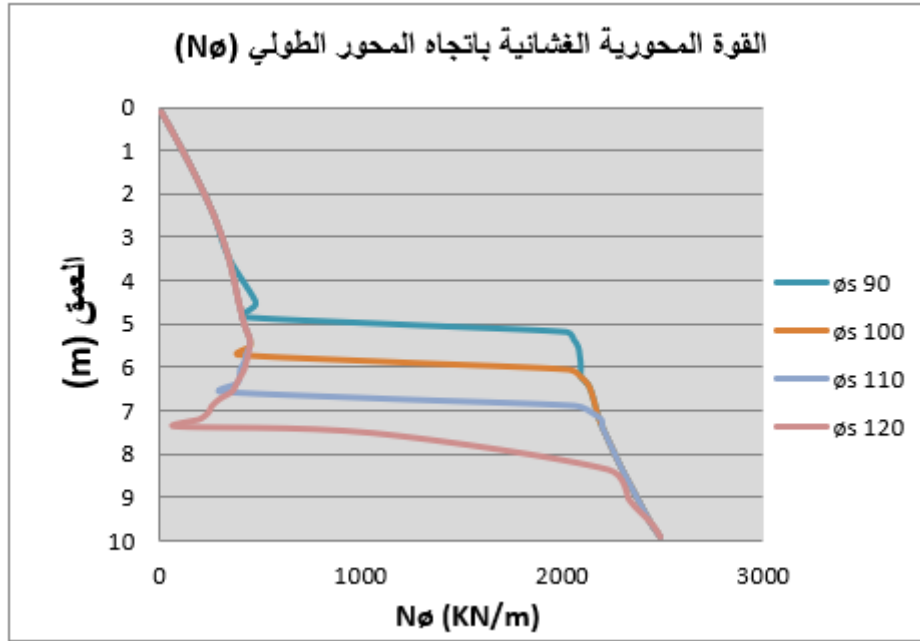
لإيجاد حل أكثر دقة يتم فيه حساب كافة القوى المؤثرة على الخزان للتأكد من قيم المتولدة والإزاحات الناتجة عنها كان علينا أن نتفادى العجز في النظرية الغشائية التي تعتمد على إهمال عزوم الانحناء فقمنا باستخدام نظرية أكثر شمولاً و دقة في تحليل مثل هذه المسائل وهي نظرية العناصر المحددة المختلطة باستخدام العناصر الدائرية المنحنية ذات الثلاث عقد وهي أحد طرق نظرية العناصر المحددة (Finite Element Method Mixed).

تم استخدام برنامج حاسوبي باستخدام معادلات نظرية العناصر المحددة المختلطة (Barony, 1977)، وتم استخدام نفس أبعاد الخزان المستخدمة في المثال المستخدم في النظرية الغشائية حيث قمنا بتقسيم الخزان إلى 30 عنصر، أي 31 عقدة وباستخدام $(a=5m)$ ، كثافة السائل $(\gamma = 100KN/m^3)$ ، $(\nu=0.3)$ ، $(E=2.11 \times 10^8 KN/m^2)$.

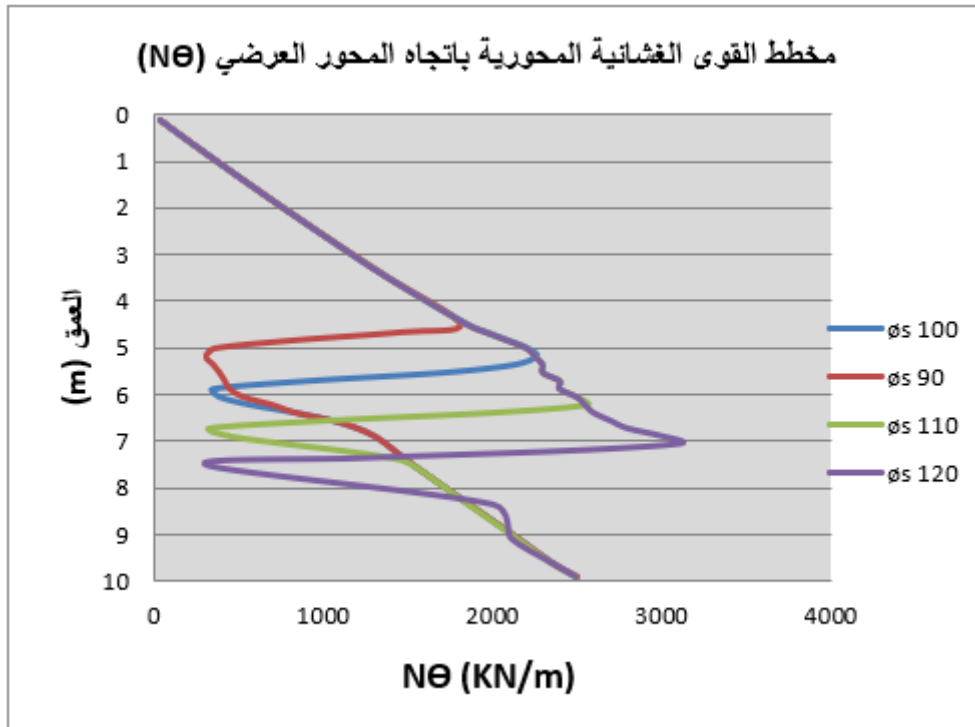
وكانت المدخلات بها تحديد لعدد العقد والأبعاد الهندسية لكل عقدة كما تتضمن خواص كل عنصر وأبعاده الهندسية ومن ثم الأحمال التي يتعرض لها كل عنصر بمختلف أنواعها.

إيجاد القوة المحورية و العزوم في الخزانات الكروية المعلقة باستخدام نظرية العناصر المحددة المختلطة وشروط حدية $(u_r = 0, u_z = 0)$ عند نقطة الارتكاز

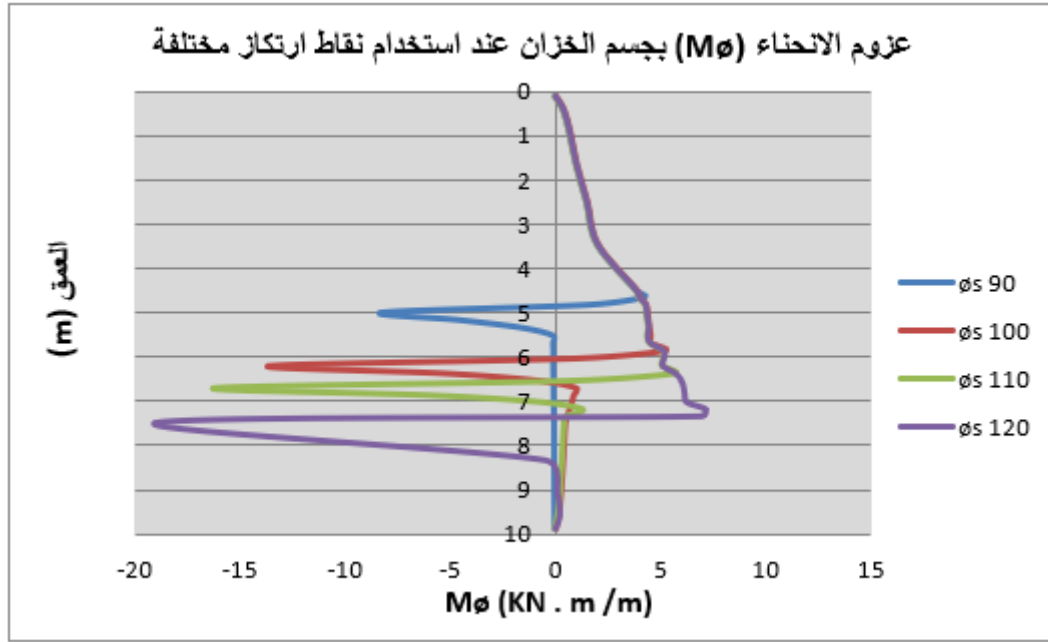
تم تغيير زوايا الارتكاز واستخدام سمك ثابت للقشريات المكونة للخزان $(t= 0.03 m)$ وتم إدخال البيانات للبرنامج الحاسوبي الخاص بتحليل القشريات الدورانية لإيجاد عدة مجاهيل منها القوى المحورية الطولية والمحيطية وعزوم الانحناء والإزاحات وغيرها، كما تم تحويلها إلى منحنيات بيانية لتوضح سلوك القشريات بعد التحميل نتيجة الإجهادات المسلطة عليها (Shteba, 2013).



شكل (9): يبين قيمة القوة المحورية N_{ϕ} بشروط حدية ($u_r = 0$ & $u_z = 0$) عند حلقة الارتكاز وبزاويا ارتكاز مختلفة (90 , 100 , 110 , 120).



شكل (10): يبين توزيع القوة المحورية N_{θ} بشروط حدية ($u_r = 0$ & $u_z = 0$) عند حلقة الارتكاز وبزاويا ارتكاز مختلفة (90 , 100 , 110 , 120).



شكل (11): يبين توزيع العزوم M_ϕ بشروط حدية ($u_r = 0$ و $u_z = 0$) عند حلقة الارتكاز وزوايا ارتكاز مختلفة (90 , 100 , 110 , 120).

الاستنتاجات المتحصل عليها في حالة شروط حدية ($u_z = u_r = 0$)

تم من خلال النتائج السابقة وباستخدام شروط حدية ($u_r = 0$ و $u_z = 0$) واختيار سمك جدار الخزان = 0.03 لإجراء مقارنات وتحليل للبيانات للحصول على قيمة (M_ϕ ، N_θ ، N_ϕ) في حالة زوايا ارتكاز مختلفة .

جدول (1): يبين قيمة القوة المحورية و العزوم (M_ϕ ، N_θ ، N_ϕ) في حالة زوايا ارتكاز مختلفة عند سمك (0.03) .

(kn.m/m) M_ϕ	(kn/m) N_θ	(kn/m) N_ϕ	ϕ_s
-8.15	357.82	1192.75	90
-3.63	351.69	1172.29	100
-16.18	335.18	1119.36	110
-19.06	316.81	1056.02	120

المقارنة والاستنتاجات

من خلال النتائج المتحصل عليها من تحليل الخزان وإيجاد الإجهادات سواء في النظرية الغشائية أو نظرية العناصر المحددة المختلطة تم التوصل إلى معرفة دقيقة للإجهادات المحورية الرأسية والمحيطية إضافة إلى عزوم الانحناء في مناطق الارتكاز والمناطق القريبة منها لمعرفة سلوك القشرية وكيفية تثبيتها مع نقاط الارتكاز حيث كانت قيمة $N\theta$ تناقص بشكل صغير مقارنة بقيمتها، مع زيادة زاوية الارتكاز ومع ذلك يحدث فيها نقص مفاجئ في المنطقة التي تسبق حلقة الارتكاز مباشرة في حالة زاوية الارتكاز ($\theta S = 120$) وكما موضح بالشكل (4)، ونظراً لتقييد حرية الحركة الأفقية و الرأسية ($u_r = 0 \& u_z = 0$) فقد حدثت تغييرات صغيرة في قيمة ($N\theta$) مع زيادة قيمة زاوية الارتكاز.

لذا يجب تجنب تثبيت الخزانات الكروية ذات الكمره الدائرية في حالة زاوية ارتكاز تساوي أو تزيد عن ($\theta S = 120$) دون الأخذ بنظر الاعتبار ما يحدث من تغييرات مفاجئة في القوة المحورية إضافة إلى الارتفاع الكبير في قيمة القوة المحورية $N\theta$ أسفل الكمره الدائرية مما يسبب قوة ضغط عالية في تلك المنطقة، كما تتولد عزوم انحناء في منطقة الارتكاز والمنطقة القريبة منها وتزيد بزيادة ϕ_s كما موضح بالشكل (11).

ونظراً لاحتساب القوة المحورية في الخزان ذو الكمره الدائرية باستخدام النظرية الغشائية بنفس الأبعاد والمواسفات و كثافة السائل المستخدم فقد تم مقارنة النتائج في حالة زاوية ارتكاز مختلفة لكل من النظرية الغشائية ونظرية العناصر المحددة المختلطة بشروط حدية ($u_r = 0 \& u_z = 0$) كما موضحة بالجدول (1)، وبتحليل النتائج المتحصل عليها بالجدول نلاحظ التقارب في القيم لكل من N_θ ، N_ϕ ، M_ϕ وإن الاختلاف في القيم يتم على منطقة الارتكاز والمنطقة المجاورة لها فإنها تزيد كلما زادت زاوية الارتكاز بما يقرب من (6 درجاتاً على وأسفل نقاط الارتكاز) وهذا يقودنا إلى تحديد المنطقة الحرجة التي يجب التعامل معها بدقة.

التوصيات

نظرية العناصر المحددة وخاصة العناصر المحددة المختلطة من النظريات الدقيقة والمتطورة، ونوصي باستخدامها في تحليل و تصميم القشريات الدورانية وخاصة قباب المساجد وصالات المناسبات مع استمرار دراسة وتحليل الخزانات والأسقف تحت تأثير الأحمال المتناظرة والغير المتناظرة.

المراجع

1- المراجع العربية:

- اشطية محمود مصطفى، الخزانات الكروية المرفوعة تحليل وتصميم، رسالة ماجستير، قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة طرابلس 2013.
- الباروني صالح يحيى؛ قنابة، الطاهر حسين، التطورات الحديثة في تحليل الصفائح والقشريات، 1991، مجلة العلوم الهندسية، طرابلس، ليبيا.
- الباروني صالح يحيى؛ عبدالناصر، يونس؛ ممدوح، محمد، نظرية الشرائح المحددة - دراسة مقارنة بين طريقة الجسوءة و الطريقة المختلطة، 2002، المؤتمر الأول لمواد البناء والهندسة الإنشائية، سبها، ليبيا.
- الباروني صالح يحيى؛ الكعبازينهال. فؤاد، الاهتزازات الحرة للقشريات الدورانية المتعامدة الخواص باستخدام طريقة العناصر المحددة المختلطة، 2002، المؤتمر الأول لمواد البناء و الهندسة الإنشائية، سبها، ليبيا.

2- المراجع الاجنبية:

- Barony S.Y., "A Study of A Mixed Finite Element Formulation And its Application to Linear and Geometrically Non-Linear Analysis Of Shells of Revolution", PHD Dissertation, 1977, University of South ampton,.
- Zingoni, Theory and Closed- form Analytical solutions, 1997, Thomas Telford publishing.
- Kabazi, Free Vibration of Shells of Revolution Using Mixed Finite Element Formulation, M sc. Thesis, civil EngDept, Faculty of Engineering, Tripoli, Libya 1995.
- Timoshenko S. P., Krieger W, Theory of plates and Shells, 1959, Megraw Hill.
- Flugge W., Stresses in Shells, Wiley,.
- Barony S.Y, Tottenham H, The analysis of rotational Shells using A Curved Ring Element and the Mixed Variational Formulation, Int. J. of Numerical Methods in Eng.,1976, vol.10,861-872,.