

استخدام النمذجة الرقمية في تقييم التشوهات المرنة و اللدنة لجدران الآبار النفطية

د.م. نضال ابراهيم¹

ملخص:

تعتبر ظاهرة تشوه جدران الآبار النفطية أثناء عملية حفر الآبار النفطية من المشاكل الرئيسية في حفر الآبار، من المهم الإشارة الى أن دراسة هذه الظاهرة يعد صعباً في ظل الامكانيات المتاحة و لخصوصية المعلومات عن مواصفات الطبقات المرنة و اللدنة. إن تشوه الطبقات الجيولوجية ينتج عن جملة من القوى و الإجهادات و أهمها الإجهادات الجيولوجية الرئيسية. يتحدد مقدار و نوع هذه التشوهات وفقاً للخصائص الميكانيكية لهذه الصخور. قدما في هذا البحث محاولة لدراسة تشوه جدران الآبار النفطية مستعينين بعلم النمذجة لما له من أهمية تجعلنا قادرين على التحليل و استنباط النتائج التابعة لفرضيات مختلفة تعطينا تصوراً عما يحدث او من الممكن حدوثه. قمنا ببناء نموذج للظاهرة المدروسة معبر عنها بمقطع افقي للبر النفطية على مستو الطبقة الجيولوجية و بعد تحميل القوى و الاجهادات المؤثرة درسنا النتائج (التشوهات) لكل من صخري الرمل (صخر مرن قصفي) و الغضار (صخر لدن) حيث تبين - من خلال إجراء فرضية تتناسب مع الشذوذات في الحالة الإجهادية في الحقول النفطية - أن الشذوذ في الحالة الإجهادية للإجهادات الجيولوجية الرئيسية يلعب دوراً مهماً في تشوه جدران الآبار النفطية.

الكلمات المفتاحية: تشوه، حفر، مرونة، لدونة.

Using numerical modeling to evaluate the elastic-plastic deformations of oil wellbore

Summary:

Deformation of oil wellbore during drilling is one of the main problems in the petroleum engineering, it is important to note that the study of this phenomenon is difficult because of the limited possibilities available and the privacy of information on the elastic and plastic properties of layers. Scientifically, The deformation of geological layers is caused by a number of forces and stresses, especially the principals stresses. This deformations are determined according to the mechanical properties of these rocks . We have provided in this paper an attempt to study the deformation of oil wellbore using modeling because of its capability to analyze the different hypotheses which give us a vision of what is happening or could happen . We have built a model of the phenomenon being studied are expressed in a horizontal section of the oil well on the geological layer , after loading forces and stresses, we analyzed the results (deformations) for the sandstone (elastic rock) and clay (plastic rock), where it is shown- by making a hypothesis fit with abnormalities in the state of the stresses in the oil fields - that the anomalies in the state of stresses of principles geological stresses plays an important role in the deformation of oil wellbore.

Keywords: Deformation, drilling, elasticity, plasticity.

1- مقدمة :

يؤدي الإخلال بتوازن القوى والإجهادات والذي ينشأ بعد الحفر إلى تضيق قطر البئر مقابل بعض الطبقات، وينتج عن ذلك صعوبة في إنزال أو رفع مجموعة مواسير الحفر والذي يلاحظ من خلال زيادة الوزن على الخطاف أثناء الرفع وتناقصه عند الإنزال، وقد تتطور إلى حد استحالة إيصال رأس الحفر إلى القاع أو رفعه إلى السطح، ولاحقاً أثناء التغليف يمكن أن يحصل استعصاء لمواسير التغليف بل وتقويضها ويجدر بنا الإشارة إلى أن تشوه الصخر باتجاه مركز البئر يكون بنسب متفاوتة وهذا يعود للمواصفات الميكانيكية للصخور.

يحدث تضيق قطر البئر نتيجة فعلين ، وفي أغلب الأحيان يجتمعان معاً:

- فعل ميكانيكي ينتج عن تشوه الصخور: هذه التشوهات تنتج بشكل اساسي عن الاجهادات الميكانيكية المؤثرة على جدران حفرة البئر المنجزة و التي تحاول اعادة التوازن الجيولوجي للمنطقة و بالتالي إغلاق البئر المحفورة بنتيجة قوى الطبيعة.

- فعل فيزوكيميائي يسببه تأثير الصخور المختزقة بسائل الحفر: الصخور القابلة للإماهة(اللغنيت،الانهدريت،الغضار...الخ) تنتفخ عند تماسها مع الماء الحر الموجود في سائل الحفر مسببة تضيق قطر البئر. [1]

ونظراً لأهمية المشكلة وما يمكن أن تسببه في حال حصولها لا بد من اتخاذ الإجراءات المناسبة لتلافي حصولها إن أمكن مثل المعرفة الجيدة والعميقة بالإجهادات المؤثرة و نوعية الشذوذات و تقديرها كميّاً والاعتماد على القدرة التنبؤية لعلم النمذجة الرقمية لمعرفة ما قد يحدث وتجريب مختلف الفرضيات المتاحة.

2- هدف البحث:

يهدف البحث لدراسة التشوهات المرنة و اللدنة في محيط جدران البئر أثناء حفر الطبقات الجيولوجية و تطبيق فرضيات مختلفة من القوى و الإجهادات بغية الوصول الى محاكاة للواقع الحقيقي للمشكلة المدروسة و بناء فرضية اكثر واقعية عما يحدث حول جدران البئر النفطية. إن الفرضيات المطبقة تهدف لمعرفة القوى الحقيقية المؤثرة و التي تتسبب في التشوهات المرنة و اللدنة للصخور الجيولوجية.

3- مواد و طرائق البحث:

استخدمنا في هذا البحث علم النمذجة و ذلك من خلال تصميم و بناء نموذج للبئر النفطية ثم تطبيق المؤثرات المختلفة على هذا النموذج معتبرين حالتين أساسيتين هما الحجر الرملي و الغضار كصخور مدروسة للوصول الى التشوهات الناتجة و بالتالي تغيير قطر البئر.

1.3. توطئة مرجعية عن تشوه و تضيق قطر البئر [6]:

يحدث تشوه و تغيير قطر البئر في الصخور المحفورة بنسب متفاوتة و تعتبر الصخور التي تتشوه بشكل كبير ذات أهمية خاصة لأنها تسبب مشاكل كبيرة كتضيق قطر البئر و حالات الاستعصاء وصولاً الى حالات التطبيق لمواسير التغليف و يمكن أن نذكر من هذه الصخور [1]:

أ. الصخور الغضارية (الشيل):

هو عبارة عن صخر رسوبي غضاري تشكل في الأحواض البحرية ونتيجة انضغاط الوحل (الغضار الطري) يتحول إلى الحالة الصلبة وعندها يسمى الشيل أو الأرجيل. وفي الأعماق الكبيرة يصبح الشيل أكثر كثافة وتماسكاً وذلك بنتيجة الضغط الذي يتعرض له بفعل وزن التوضعات الصخرية التي تعلوه. ويمكن أن يكون الشيل عرضة للضغوط التكتونية بالتوازي مع ارتفاع درجة الحرارة [3].

يصنف الشيل حسب حركيته الى: شيل متهدم (sloughing)، شيل منهار (heaving)، شيل ساقط (running)، الشيل المتحرك أو الزاحف (plastic flow).

إن السبب الاساسي لعدم استقرار الغضار يكون هو الاجهادات الجانبية حول حفرة البئر والتي تعتمد على مقدار الاجهادات في الموقع الأصلي (قبل الحفر) والضغط داخل حفرة البئر ولدونة الصخر وعلى زاوية ميل البئر. كما أن انحدار الطبقة يمكن أن يكون عامل مساهم في حركية الغضار.

ب. الإسفلت:

هو الأجزاء الثقيلة من النفط التي بقيت في الصخر بعد هجرة النفط إلى أماكن أخرى و مع التواجد الكثيف للإسفلت تتشكل طبقة اسفلتية ذات حركية خطيرة على حفر الابار. يقسم الإسفلت حسب درجة الحرارة التي كان موجوداً عندها وحسب درجة الخطورة إلى إسفلت عادي وهو الإسفلت الذي نتعامل معه كصخر حيادي لا يؤثر على الحفر وهو يقع قرب السطح أو على السطح حيث درجة الحرارة متدنية (لا تؤثر فعلياً على الإسفلت). و إسفلت متوسط الخطورة وهو الإسفلت الواقع على أعماق متوسطة ودرجات حرارة متوسطة أيضاً تكون كافية لإعطائه ليونة معينة في الطبقة. أثناء اختراق هذا الإسفلت فإنه نتيجة اللدونة التي يملكها يتجه للبئر حيث يتجمد على مجموعة مواسير الحفر مؤدياً إلى استعصائها. و أخيراً الإسفلت الخطر جداً ويوجد على أعماق كبيرة وتحت درجات حرارة مرتفعة حيث تكون لزوجته وحركيته كافية كي يندفع باتجاه البئر بكميات كبيرة ثم يتجمد عند تلامسه مع سائل الحفر ويلتصق على المواسير مؤدياً إلى استعصائها. هذا النوع من الإسفلت غالباً ما يحفر بسائل حفر ذي أساس نفطي ووزن نوعي مرتفع [6]. [3].

ت. الملح:

الطبقات الملحية المصادفة في عمليات الحفر تكون متنوعة من ملح كلور الصوديوم النقي إلى الخلائط المعقدة من كلور الصوديوم. المشكلة الرئيسية للقطاعات الملحية

تتلخص في حركة الملح أو زحف الملح هو عملية معقدة تتحكم بها مجموعة من العوامل تابعة للعمق ودرجة الحرارة و الاجهادات الجيولوجية وتركيب الماء [9].

2.3 أساسيات علم النمذجة [8]:

يعتبر النموذج أو الموديل هو أساس النمذجة و أخذت اسمها منه و يعبر النموذج عن عملية أو ظاهرة فيزيائية أو نظام ميكانيكي بشكل يسمح بالاستعاضة عن النظام الحقيقي أو الظاهرة الحقيقية. إن تطبيقات وفوائد النمذجة كثيرة نذكر منها:

- وصف الظواهر والأنظمة الحقيقية حيث يتم من خلال ذلك فهم كيفية حدوث الظواهر وبالتالي نصل إلى محاولة فهم الأشياء أو الظواهر التي ندرسها.
- التأكد من فرضية أو نظام محدد(ثباتية جدران البئر، زحف الطبقات)
- القدرة على التنبؤ بردة فعل النظام أو الظاهرة وذلك من خلال المعرفة الدقيقة للظاهرة.
- تحديد أبعاد و قيم مثالية و المساعدة في التصميم و البناء مثلاً(تصميم مجموعات مواسير الحفر بحيث نحافظ على المتانة خلال النظام الساكن و الديناميكي للعمل على الحفارة).

سوف نعتمد في هذا البحث على النماذج الرياضية للتعبير عن الظاهرة الفيزيائية، ومن أهم مزايا هذه النماذج بساطتها وإمكانية تطبيقها وإيجاد البارامترات (المجاهيل) لهذه الموديلات من خلال عدد قليل من التجارب، أخذين بعين الاعتبار وجود نماذج رياضية معقدة كي تعبر قدر الإمكان عن تعقيدات الظاهرة الفيزيائية.

وتجدر الإشارة إلى أنه يجب اختيار النموذج الرياضي بدقة وعناية لما له من أهمية في نوعية النتائج.

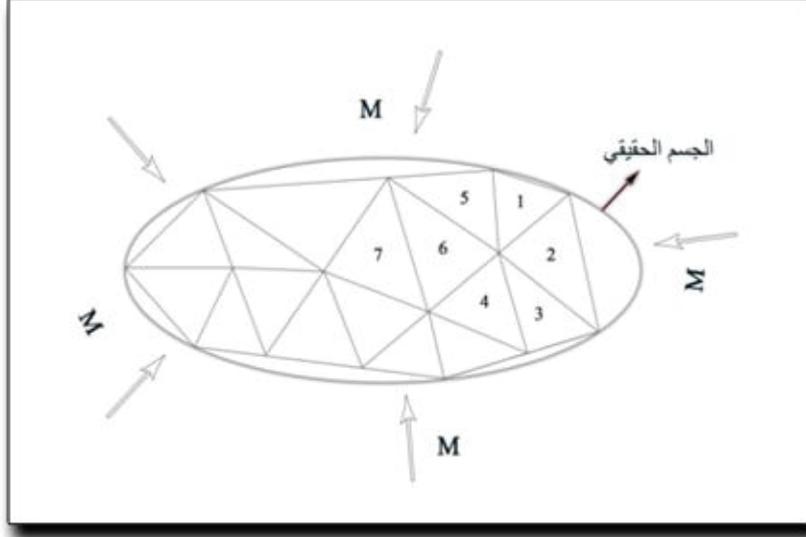
- إن المبدأ العام لعملية النمذجة [7] ممثّل من خلال الشكل (1):



شكل (1) المبدأ العام لعملية النمذجة.

حيث نلاحظ أن النموذج يعبر عن الظاهرة من حيث ردة فعلها لتعطينا النتائج على شكل أثر ناتج عن المؤثرات المختلفة على الموديل أو الظاهرة. إن آلية حل النموذج الرياضي تحليلياً هي آلية معقدة جداً وخاصة في حال كون النموذج فراغي (3D)، لذلك يتم اللجوء إلى طرق حل رقمية وهذه الطرق تتمثل بقدرتها على معالجة المشكلة المطروحة رقمياً ، حيث يُصار إلى تجزئة المشكلة إلى مراحل رقمية يتم التعامل معها حيث تعطينا نتائج جزئية ومن خلال مراكمة هذه النتائج الجزئية والجمع بينها نحصل على نتيجة عامة أو رد فعل النموذج النهائي.

من أهم الطرق العددية المستخدمة في حل الموديلات الرياضية هي طريقة العناصر المنتهية [10]. يتلخص مبدأ هذه الطريقة الشكل (2) بتقسيم الجيومتري للظاهرة (الحيز الهندسي لها) إلى عناصر ذات عدد محدود و بمعرفة الشروط الحدية المطبقة على الجيومتري نتمكن من تحديد كافة البارامترات وحل النموذج الرياضي على العناصر الموجودة على حدود الجيومتري والتي بدورها سوف تصيح شروطاً حدية للعناصر المجاورة وبالتالي نستطيع حل الموديل الرياضي للعناصر المجاورة الحدية لهذه العناصر. ويتكرر هذه العملية نستطيع حل الموديل الرياضي على كل عناصر الجيومتري وبالتالي وعن طريق تجميع وربط رد فعل كل العناصر معاً نحصل على رد فعل الجيومتري كاملاً.



شكل (2) يعبر عن مبدأ طريقة العناصر المنتهية

حيث نلاحظ أن الجسم الحقيقي في الشكل (2) هو عبارة عن شكل بيضوي يخضع لمؤثرات خارجية M معلومة .

- إن حل النموذج على العناصر $1, 2, 3, 4, 5$ يمكننا من حل النموذج على العناصر $4, 5, 6$ بتكرار هذه العملية يصبح العنصر رقم 6 شرطاً حدياً للعنصر رقم 7،... الخ.

بتعميم هذا الأسلوب من كافة حدود الجسم نستطيع حل الجملة كاملةً.

في نهاية المطاف إن التجزئة الرقمية للوسط المدروس بالنسبة لجملة الأحداثيات يعبر عنها بالتفاضل الجزئي للنموذج الرياضي بالنسبة لجملة أحداثيات (المشتق الجزئي لمتغيرات الظاهرة الجزئي بالنسبة ل X والمشتق الجزئي بالنسبة ل Y والمشتق الجزئي بالنسبة إلى Z).

وعند إخراج النتائج والحصول على الأثر للمؤثر تتلخص العملية بتكامل جزئي لكل عنصر بالنسبة لإحداثيات وبتكامل كلي للحيز الهندسي بالنسبة لعناصره.

1.2.3 مراحل النمذجة الرقمية:

إن كل عملية نمذجة تمر بالمراحل التالية:

- 1- بناء الجيومتري (الشكل الهندسي) للظاهرة المدروسة.
 - 2- تحديد قانون تصرف المادة المراد استخدامه وتحديد عناصره و متغيراته.
 - 3- تحديد المراحل المختلفة لتطبيق القوى المؤثرة.
 - 4- تحديد العلاقة بين مختلف أجزاء الحيز الهندسي (عندما يتألف من أكثر من جزء).
 - 5- تحديد الشروط الحدية على حدود الجيومتري من انتقالات و قوى.
 - 6- بناء الشبكة الهيكلية للحيز الهندسي (تقسيم الحيز الهندسي إلى عناصر منتهية).
 - 7- تنفيذ عملية النمذجة وإخراج النتائج.
- سوف نتطرق إلى شرح المعايير الرئيسية لكيفية اختيار وتحديد كل مرحلة من مراحل النمذجة.

أ. بناء الجيومتري للظاهرة المدروسة:

هو عبارة عن الشكل الهندسي (سواء كان أحادي البعد 1D أو ثنائي الأبعاد 2D أو 3D فراغي) المعبر عن الظاهرة وبشكل أدق عن حدود الظاهرة الفيزيائية، ولدينا حرية اختيار الشكل الهندسي كبعد واحد أو ثلاثة أبعاد ولكن يجب احترام شرط أساسي وهو عدم إغفال أي جزء رئيسي يؤثر على الظاهرة و ردة فعلها، فمن غير المعقول مثلاً: التعبير عن ظاهرة تحتاج حيز هندسي ثلاثي الأبعاد من خلال حيز هندسي ببعدين أو ببعد واحد (دراسة التشوه الحجمي لعينة صخرية تتطلب منا حكماً بناء حيز هندسي ثلاثي الأبعاد) [7].

إن الأبعاد المختارة للحيز الهندسي ليست عشوائية بل يجب أن تتطابق مع الشروط الحدية على المسافة المدروسة فمثلاً: عند تطبيق شرط حدي يعبر عن قيمة تساوي 5 يجب أن تكون قيمة هذا البارامتر عند حدود الجيومتري حقيقية وتساوي 5.

ب. تحديد قانون تصرف المادة المراد استخدامه و تحديد بارامتراتة:

تبعاً للظاهرة الفيزيائية المدروسة لدينا نماذج رياضية تتطور باستمرار لتعبر بأمانة أكثر عن الظاهرة الفيزيائية ولكن مع تطور الموديلات تتطلب منا تحديد عدد أكبر من البارامترات و بالتالي عمل تجريبي أطول وعدد تجارب أكبر لذلك فمن المستحسن اختيار موديل بسيط ما أمكن مع مراعاة الأمانة العلمية في التعبير عن الظاهرة و الأخطاء المرتكبة أقل ما يمكن.

ت. تحديد المراحل المختلفة لتطبيق المؤثرات و كيفية تطبيقها:

في هذه الخطوة يجب محاكاة الحقيقة من خلال المراحل المختلفة التي تمر بها الظاهرة. ففي حالة الدراسات الجيوتقنية يجب البدء في النمذجة الرقمية بالتوازن الجيوستاتيكي القائم قبل الإخلال بهذا التوازن ومن ثم في الخطوة اللاحقة يُصار إلى تطبيق المؤثرات التي أدت إلى الإخلال بهذا التوازن و معرفة ما سوف يحدث.

ث. تحديد العلاقة بين مختلف أجزاء الحيز الهندسي :

يجب اختيار حيز هندسي بسيط ما أمكن وذلك لتفادي التعقيدات التي تنتج من اختيار حيز هندسي معقد وبنفس منهجية التبسيط يستحسن التعبير عن الظاهرة من خلال حيز هندسي بجزء واحد(حيز هندسي وحيد)، لأنه في حالات أخرى يتم بناء أكثر من حيز هندسي و من ثم تجميعها لتشكل الحيز الهندسي العام للظاهرة، فمثلاً : إن نمذجة دخول سن رأس الحفر في الصخر تتطلب بناء حيز هندسي للسن و حيز هندسي للصخر و من ثم تجميعهما معا و تحديد نوعية العلاقة المتبادلة بين نقاط التماس بينهما.

ج. تحديد الشروط الحدية على حدود الجيومتري من انتقالات و قوى:

إن الشروط الحدية يمكن تقسيمها إلى قسمين في حالة الدراسات الجيوتقنية:

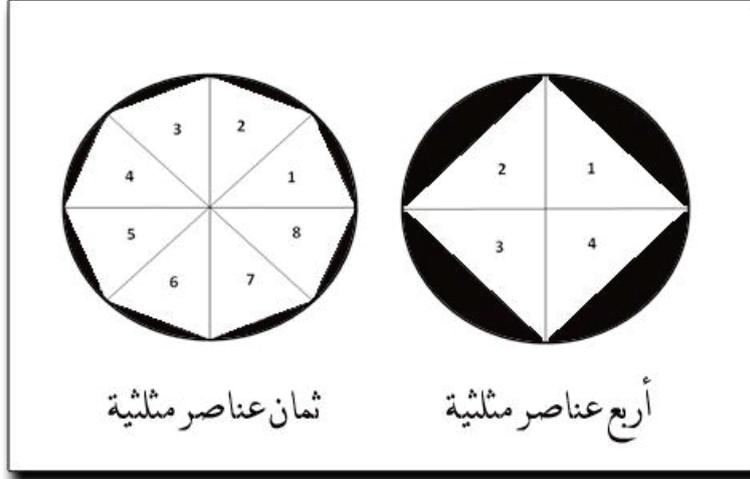
1- الانتقالات: حيث يجب تحديد الانتقالات كمياً على حدود الحيز هندسي وما هي المناطق الحدية من الحيز هندسي التي سوف تتعرض لانتقالات بشكل قسري كمؤثر. تتحدد الإنتقالات إما بشكل مخبري من خلال قياس قيمها في مناطق مختلفة من الحيز الهندسي الحقيقي للظاهرة (إن كان ذلك ممكناً) أو نلجأ الى البحث عن المناطق من الحيز الهندسي و التي تكون فيه قيم الإنتقالات معروفة أو من الممكن القيام بفرضية حول قيمها (على حدود الحيز الهندسي و على مسافة كافية يمكن فرض قيم للانتقالات تساوي الصفر)

2- القوى: يجب تحديد القوى المؤثرة على الحيز هندسي و قيم هذه القوى وهل هذه القوى متساوية الشدة خلال كامل مراحل النمذجة؟ يجب أن تكون القوى معبرة عن القوى الحقيقية المؤثرة على الحيز الهندسي للظاهرة .

ح. بناء الشبكة الهيكلية للحيز الهندسي (تقسيم الحيز الهندسي إلى عناصر

منتهية):

تبنى الشبكة الهيكلية للحيز الهندسي معتمدةً على أنواع العناصر المنتهية المشار إليها سابقاً من حيث عدد الأبعاد المختارة للحيز الهندسي [10]. يجب بشكل مثالي اختيار أكبر عدد ممكن من العناصر المنتهية لبناء الشبكة الهيكلية أي بتعبير آخر الحصول على شبكة هيكلية ذات دقة عالية وذلك كي نتمكن من التعبير عن الحيز الهندسي للظاهرة بشكل دقيق.



شكل (3) يظهر تقسيم الجيومتري إلى عناصر منتهية

في الشكل الأيمن لدينا أربع عناصر تم التعبير بها عن الحيز الهندسي (دائرة). نلاحظ أن المساحات غير المغطاة بالشبكة الهيكلية من الدائرة (المساحة المظللة) هي مساحات سوف تهمل خلال عملية النمذجة وتكون الأخطاء مرتكبة خلال عملية الحسابات. أما في الشكل الأيسر فقد قسمنا الدائرة إلى ثماني عناصر مثلثية فنلاحظ أن الدقة في التعبير عنها كانت أكثر وأفضل. إن زيادة عدد العناصر المنتهية إلى قيمة كبيرة يؤثر من خلال تعقيد عملية الحسابات وبالتالي إطالة زمن الحساب وما يتبع ذلك من تكاليف مادية تتعلق بنوع الأجهزة القادرة على القيام بهذه الحسابات، إن التوازن الأمثل يكمن في اختيار عدد عناصر كافٍ للتعبير بأمانة عن الظاهرة مع مراعاة عدم إقبال الحسابات إلى درجة كبيرة. لذلك من المفضل أن تكون الشبكة الهيكلية كثيفة كفاية في المناطق المهمة (جوار جدران البئر) وقليلة الكثافة ما أمكن في المناطق غير المهمة بعيداً عن جدران البئر.

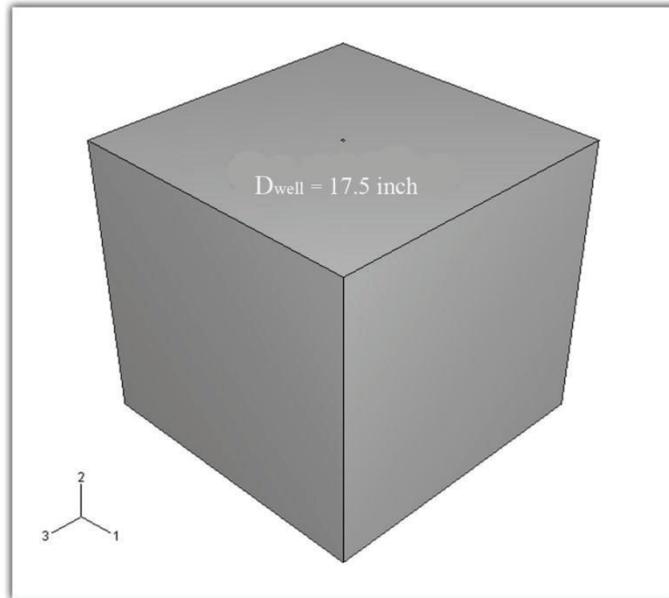
إن نوع العناصر المختارة يتبع نوع الجيومتري و يفضل اختيار عناصر ذات نظام تكاملي أو تفاضلي مبسط مثلثية الشكل مثلاً للحصول على نتائج أدق [2].

خ. تنفيذ النمذجة و إخراج النتائج:

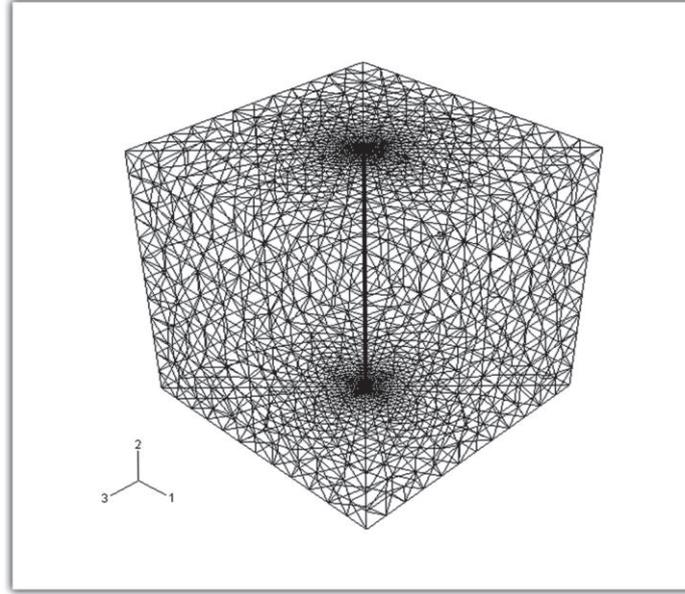
بعد تنفيذ عمایة النمذجة يتم إخراج النتائج المطلوبة و التي هي على شكل حقول تساوي القيم و منحنيات تغير البارامترات المرجوة أو المطلوبة مع بارامترات أخرى.

4. القسم العملي:

لقد استخدمنا بيئة للنمذجة تسمى (ABAQUS) و تعتبر من البيئات الجيدة لإجراء عمليات النمذجة و المحاكاة. اعتبرنا أن لدينا بئراً نفطياً تم انجاز المرحلة السطحية منه و نحن ضمن المرحلة الوسطية ذات القطر $17\frac{1}{2}$ inch عند العمق (2000 متر) و أن الطبقة التي نخرقها عبارة عن طبقة رملية في المرة الاولى و طبقة غضارية في المرة الثانية و بناءً على ذلك: في الخطوة الأولى تم اختيار الحيز الهندسي (3D) على شكل مكعب يظهره الشكل (4) والبئر في منتصفه بقطر $17\frac{1}{2}$ inch والشكل (5) يظهر الشبكة الهيكلية لهذا المكعب (Mesh) حيث وصل عدد عناصر الشبكة إلى 150 ألف عنصر وهذا ضخم جداً و يتقل عملية الحسابات لذلك قمنا هنا بتبسيط الحيز الهندسي باختياره ثنائي البعد $2D$ وأبعاده $(10 \times 10 \text{ m})$ كما يوضحه الشكل (6).

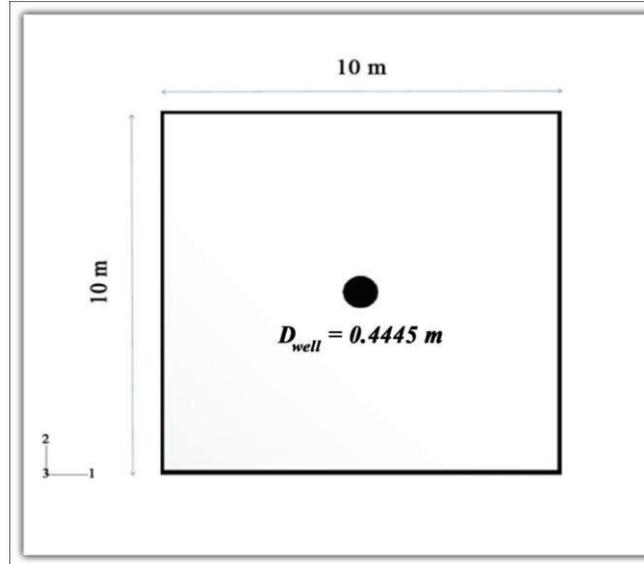


شكل(4) يبين الجيومتري 3D



شكل (5) يوضح الشبكة الهيكلية (Mesh) للجيومتري 3D

والشكل (6) يوضح الحيز الهندسي المدروس 2D كما يظهر في بيئة النمذجة (ABAQUS). إن اختيار هذه الأبعاد (10x10 متر) يعتمد على قاعدة بسيطة و هي أن الانتقالات و التشوهات على أطراف الحيز الهندسي يجب أن تكون معدومة (الشروط الحدية يجب أن تكون معروفة) و بهذا نكون قد حددنا بشكل مسبق من خلال هذه الفرضية قيم الانتقالات على حدود الظاهرة [8].



شكل (6) يوضح الحيز الهندسي المدروس

في **الخطوة الثانية** قمنا باختيار خواص المادة (Material) حيث أخذنا نوعين من الصخور وهما الحجر الرملي و الغضار وقد تم اختيار هذين الصخرين نظراً لأن الحجر الرملي يعتبر مرناً قسيفياً من وجهة النظر الميكانيكية و بالتالي يمكن التعبير عنه من خلال بارامترات المرونة و أما الغضار فسوف نعبر عنه من خلال جزء مرن و من ثم سوف نعتبره خاضعاً لنظرية اللدونة التامة. والجدول (1) يوضح البارامترات الميكانيكية المستخدمة ضمن عملية النمذجة [5].

جدول (1) يوضح البارامترات الميكانيكية المستخدمة ضمن عملية النمذجة

الصخر	معامل بواسون ν	معامل يونغ (Mpa)
الحجر الرملي	0.33	35000
الغضار	0.23	4000 و من ثم لدونة تامة (حد الخضوع يساوي 21 Mpa)

إن النموذج المستخدم للتعبير عن سلوك الحجر الرملي هو نموذج المرونة (قانون هوك المعمم). أما النموذج الذي تم اعتماده للغضار فهو قانون هوك في المجال المرن و من ثم يخضع الصخر لحالة من اللدونة التامة عند حد خضوع يساوي (21 Mpa).

في الخطوة الثالثة طبقنا الشروط الحدية (Boundary Conditions) حيث :

- تم تثبيت حدود النموذج بحيث تكون قيمة الانتقالات عند الحدود معدومة (تم اختيار أبعاد النموذج بهدف جعل قيمة الانتقالات عند الحدود تساوي الصفر اي أن الحدود بعيدة كفاية عن جدران البئر.

- نحسب الضغط الناتج عن عمود سائل الحفر على عمق البئر (2000 متر) بفرض أن كثافة سائل الحفر هي :

$$\rho_{mud} = 1.25 \text{ g / cm}^3$$

$$P_{mud} = 1.25 \times 10^3 \times 10 \times 2000 = 25 \text{ MPa}$$

- إذا اعتمدنا على نظرية المرونة الخطية نستطيع حساب الاجهادات الجيولوجية الرئيسية وذلك بفرض أن سماكة الطبقات التي تعلو الطبقة المدروسة

$$H = 2000 \text{ m}$$

$$\rho_{rock} = 2,5 \text{ gr/cm}^3 \quad ، \text{ وفرضنا ان الكثافة الوسطية للصخور هي :}$$

حيث يعطى ضغط الصخور العمودي كما يلي:

$$\sigma_v = \rho_{rock} \cdot g \cdot H$$

$$\sigma_v = 2.5 \times 10^3 \times 10 \times 2000 = 50 \text{ MPa}$$

إن قيمة الإجهاد الجانبي تحسب عادة بمساعدة معامل بواسون كما يلي:

$$\sigma_h = \frac{v}{1-v} \times \sigma_v = \frac{0.23}{1-0.23} \times 50 = 0.3 \sigma_v$$

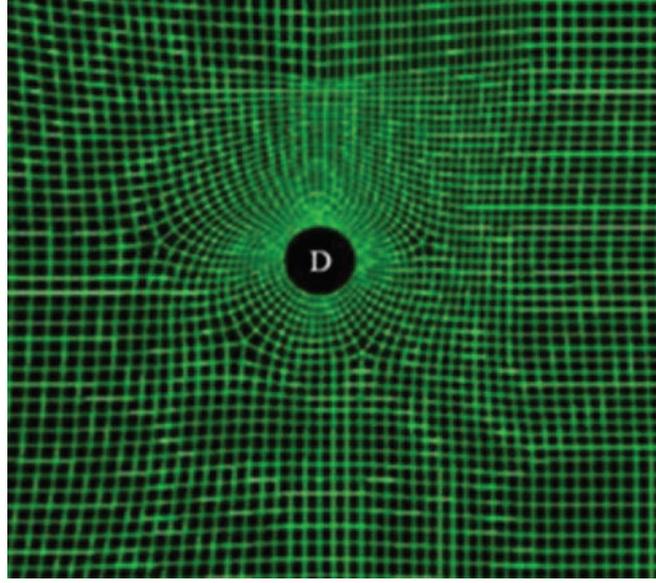
$$\sigma_h = 15 \text{ MPa}$$

إن هذه القيمة تعتبر منطقية في المناطق المنبسطة و المناطق الخالية من شذوذات تكتونية و يمكن أن نلاحظ أن قيمة الضغط الهيدروستاتيكي لسائل الحفر كافية للتغلب على قيمة الضغط الجانبي للصخور و بالتالي لن يحدث تشوه في جدران البئر النفطية. لذلك فإن نظرية المرونة الخطية لا تعتبر طريقة صحيحة للتعبير عن الحالة الإجهادية في الحقول النفطية. من خلال معرفتنا التامة بوجود شذوذات تكتونية تظهر من خلال الطيات و الفوالق و غيرها في مناطق الحقول النفطية، فلا بد من اعتماد قيمة أكبر للضغط الجانبي تحاكي القيم الحقيقية التي تؤدي لعدم ثبوتية جدران الآبار النفطية. إن قيمة الإجهاد الأفقي تكون في حالات متعددة قريبة من الاجهاد العمودي أو في حالات قصوى تكون أكبر منه و يمكننا فقط التذكير بأن الفوالق العكسية تعبير مباشر لكون الإجهاد الأفقي الأعظمي أكبر من الإجهاد العمودي و بالتالي تم انزياح الطبقات الصخرية باتجاه الأعلى عكسياً [8][4].

بناءً على ما سبق افترضنا أن قيم الإجهاد الأفقي متساوية و تساوي 80 % من قيمة الإجهاد العمودي (في حال وجود فوالق عكسية في الحقل النفطي، يجب أخذ قيمة الإجهاد الأفقي أكبر من الإجهاد العمودي [8] . في ظل غياب المعطيات عن قيم هذه الإجهادات تعتبر هذه الفرضية مقبولة تماماً في هذا البحث :

$$\sigma_{Hmin} = \sigma_{Hmax} = 0.8 \times \sigma_v = 40 \text{ MPa}$$

إن القيم المحسوبة أعلاه تشكل المؤثرات المختلفة المطبقة على الجيومتري. في الخطوة الرابعة يتم تصميم و اختيار الشبكة الهيكلية حيث أننا كتفنا هذه الشبكة بجوار جدران البئر. وتم استخدام عناصر رباعية الأضلاع عددها /4000/ عنصر (الشكل 7).

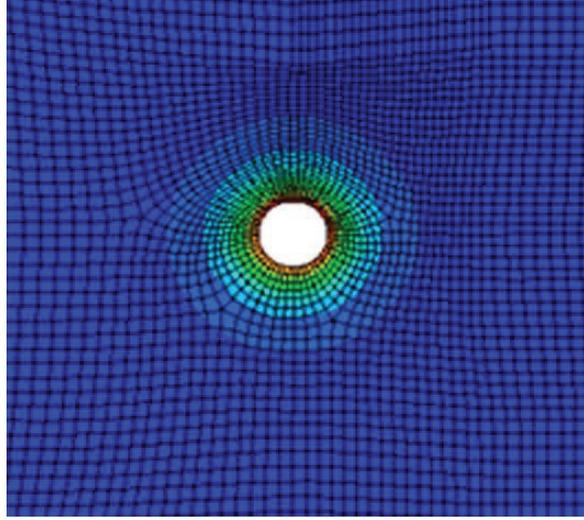


شكل (7) يوضح الشبكة الهيكلية للحيز الهندسي المدروس.

5. النتائج ومناقشتها :

بعد تطبيق عملية النمذجة وحساب حقول تساوي الإجهادات والتشوهات والانتقالات
نختار إظهار نوعين من النتائج:

1- الحالة الإجهادية في نهاية حالة التحميل:

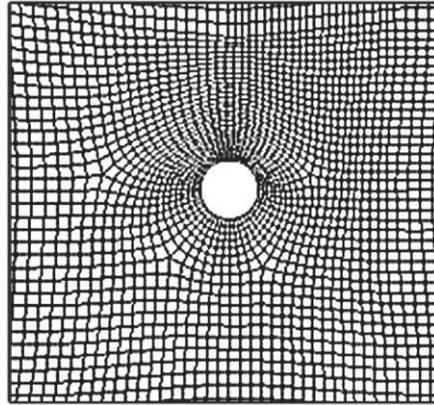


شكل (8) يوضح خطوط تساوي الإجهادات في نهاية حالة التحميل.

يبين الشكل (8) أن الإجهاد متناظر في كل الجهات وذلك لأننا أخذنا :

$$\sigma_{Hmax} = \sigma_{Hmin} = 40 \text{ MPa}$$

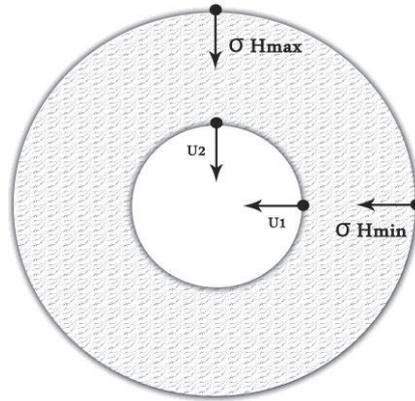
وبالتالي نتوقع أن يكون تغير قطر البئر متجانساً كما يظهر الشكل (9) حيث أظهرنا تشوهات الشبكة الهيكلية للجيومترى وبالتالي لقطر البئر نتيجة التحميل.



شكل (9) يظهر تشوه قطر البئر نتيجة عملية التحميل.

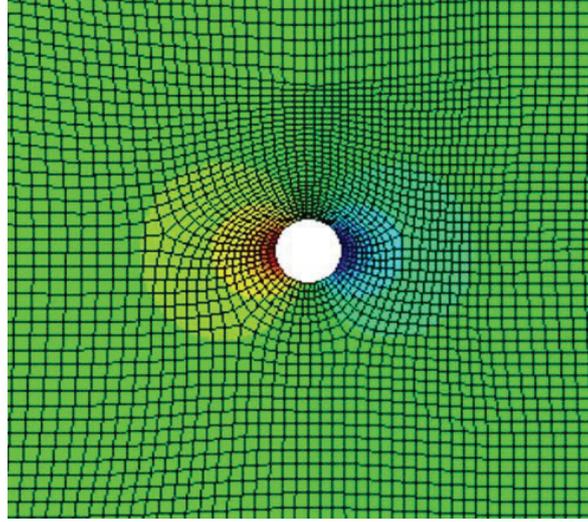
2- الانتقالات في نهاية مرحلة التحميل:

تم إظهار قيم تساوي الانتقالات للحجر الرملي الأشكال (11) و (12) وفق الاتجاهين 1 و 2 كما يبين الشكل (10) و ذلك بهدف تقييم التضيق الحاصل لقطر البئر بشكل كفي و كمي. حيث تعبر U_1 عن تغير قطر البئر وفق المحور 1 و تعبر U_2 عن تغير قطر البئر وفق المحور 2. إن الأشكال الخاصة بالانتقالات للغضار تشابه الى حد كبير الأشكال (11) و (12) و لكن يكمن الاختلاف في قيم التشوهات الحاصلة و التي ندرجها في الجدول (2).



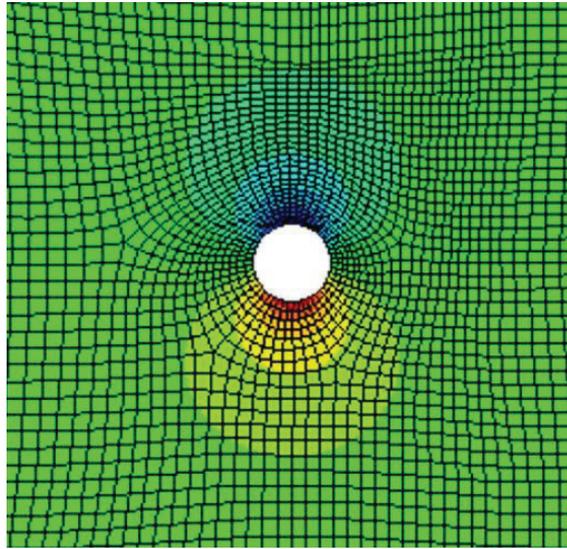
شكل (10) يوضح حفرة البئر والاجهادات والانتقالات المدروسة .

يظهر الشكل (11) خطوط تساوي الانتقالات U_1 ، حيث يظهر الشكل كيفية توزع الانتقالات و بالتالي التشوهات الحاصلة وفقاً لهذا المحور. يبدو واضحاً أن قيمة الانتقالات القصوى تكون دائماً على جدران البئر و تتخامد هذه التشوهات باتجاه العمق داخل الطبقة، نلاحظ أن قيمة الانتقالات على أطراف الجيومتري تأخذ قيمة صغيرة جداً و هذا يدعم فرضيتنا الاولى بجعل الانتقالات على محيط الجيومتري معدومة. إن المحاكمة السابقة تنطبق على الشكل (12) و لكن وفق المحور 2.



شكل (11) يظهر خطوط تساوي الانتقالات U1 في حالة الحجر الرملي في

نهاية حالة التحميل



شكل (12) يظهر خطوط تساوي الانتقالات U2 في حالة الحجر الرملي في

نهاية حالة التحميل .

- تعطينا النتائج قيم متساوية لشدة الانتقالات U_1, U_2 للصخر الواحد:

$$\sigma_{Hmax} = \sigma_{Hmin} \rightarrow U_1 = U_2$$

وذلك يثبت التشوه المتجانس لقطر البئر ولكن بالمقابل لدينا تشوه للغضار أكبر من تشوه الحجر الرملي وهذا عائد إلى اختلاف المواصفات الميكانيكية لكلا الصخرين. إن فرضية أن الإجهادين الأفقيين هما متساويين هي فرضية للتبسيط فقط. يبين الجدول (2) تطور التشوه و كيفية تضيق قطر البئر تبعاً لمراحل عملية النمذجة حيث نلاحظ القيم العظمى لكل من الغضار و الرمل.

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = 0.002 \text{ m} \quad \text{للحجر الرملي : تغير قطر البئر الكلي}$$

$$\Delta U_2 = \Delta U_1 = 0.12 \text{ m} \quad \text{للغضار: تغير قطر البئر الكلي}$$

و عند هذه القيم العظمى يكون القطر النهائي للبئر:

للحجر الرملي:

$$D'_{Well} = D_{Well} - \Delta U_1 = 0.444 - 0.002 = 0.442 \text{ m}$$

للغضار:

$$D'_{Well} = D_{Well} - \Delta U_1 = 0.444 - 0.12 = 0.324 \text{ m}$$

الجدول (2) قيمة التشوهات و تضيق قطر البئر مع مراحل النمذجة

8	7	6	5	4	3	2	1	مراحل النمذجة	
2	0.95	0.7	0.091	0.032	0.006	0.001	0	الحجر الرملي	الانتقالات (مم)
120	113.6	102.3	85.3	29.1	0.61	0.04	0	الغضار	

الاستنتاجات والتوصيات :

مما سبق يمكن أن نخلص إلى جملة من الاستنتاجات:

1- إن الإجهادات الجيولوجية الرئيسية تعتبر سبباً مهماً لظاهرة تضيق قطر البئر أثناء عملية الحفر.

2- إن المواصفات الميكانيكية للطبقات الصخرية و خاصة اللدنة(حالة الغضار هنا) تعطىها خاصية التشوه بقيم كبيرة و بالتالي تضيق قطر الابار النفطية بشكل كبير الذي يؤدي لمشاكل مختلفة من الاستعصاء و غيرها.

3- من المهم جداً دراسة الصخور المخترقة ضمن البئر و معرفة مواصفاتها الميكانيكية بدقة.

4- يجب الإحاطة بالتاريخ الجيولوجي للمنطقة التي يقع فيها المكنن و محاولة تقدير قيم الإجهادات الجيولوجية الرئيسية و خاصة الشذوذات الحاصلة و قيمها النسبية بعضها بالنسبة لبعض.

5- يجب دراسة الفوالق في المنطقة و ملاحظة نوعها فالفوالق العكسية تعني و بشكل صريح أن الإجهاد الأفقي هو أعظمي و أكبر من الإجهاد العمودي.

6- في البحث فرضنا أن قيمة الإجهاد الأفقي هي 80% من قيمة الإجهاد العمودي و وجدنا أن نصف قطر البئر قد تضيق بمقدار 27% .إن هذه القيمة تعتبر كبيرة سلفاً فكيف عندما نصادف إجهاد أفقي أكبر من الإجهاد العمودي.

7- يعتبر دور سائل الحفر مهم جداً كقوة معاكسة لعملية تضيق قطر البئر الناتج عن تشوه الصخور و لكنه و عند القيم الكبيرة للإجهاد الأفقي يغدو ضرورياً رفع الوزن النوعي لسائل الحفر إلى قيم كبيرة لمجابهة هذه التشوهات.

8- يجب تخطيط عمليات التغليف للقطاعات التي عانت من زحف طبقي بشكل جيد و نوعية تغليف مقاومة للضغوط الى أقصى حد ممكن.

كي يتم إغناء هذه الدراسة لا بد من تجسيد حالات حقلية واقعية و مطابقة النتائج الحقلية مع نتائج عملية النمذجة، و لا بد أيضاً من استخدام موديلات رياضية أكثر تعقيداً لتعبر عن الصخور المدروسة بأمانة(إضافة الشروط التطبيقية في الحسبان) و خصوصاً بعد معرفة مواصفاتها الميكانيكية بشكل جيد.

. المراجع :

- 1- د. طاهر منصور، د. مسرور سليمان. 2009- هندسة الحفر (3). منشورات جامعة البعث-كلية الهندسة الكيميائية و البترولية، الطبعة الأولى، 418 صفحة.
- 2- BEN-MANSOUR .R, HABIB. M.A , QAIYUM. A, May 2008- Modeling of fluid flow in a tube with a moving indentation. King Fahd University of Petroleum and Minerals (KFUPM), Saudi Arabia.
- 3- FARHAT .M.S,1985- Drilling Problems and their Remedy. 613p.
- 4-Fjaer E. et al, 2008- Petroleum Related Rock Mechanics, 2nd Ed. 515p.
- 5- IBRAHIM N., SIBAI M., KONDO D., SHAO J.F.2007- Caractérisation des propriétés des roches par Micro indentation. Studia geotechnica et mechanica. Vol. XXIX (3-4), 89 – 100.
- 6- RABIA H. 2002-Well Engineering and Construction , Wellbore stability.783p.
- 7-Schechter.R, 1992- Oil well simulation , University of Texas,312p.
- 8- Springman S-2009- Modelling in geotechnics. Institute of Geotechnical Engineering, 175p.
- 9- WEIDINGER .P , HAMPEL .A, February 1997- Creep behaviour of natural rock salt and its description with the composite model , Hannover,Germany.
- 9- YIJUN. Liu , May 2003-introduction to the finite elements method. University of Cincinnati U.S.A.

