

دراسة الحالة الإجهادية للصخور المتناظرة عرضياً أثناء انغراس أسنان رأس الحفر فيها

اعداد : أ.م.د نضال ابراهيم¹

ملخص:

تتلخص عملية الحفر بتفتيت الصخر بواسطة أسنان رأس الحفر و التي تنغرس بتأثير الحمل المطبق على هذه الأسنان كجزء من وزن أعمدة الحفر. إن دراسة الحقل الإجهادي تحت سن رأس الحفر و تحت مجمل الأسنان العاملة على القاع يعد أمراً مهماً من وجهة نظر ميكانيك تفتيت الصخور. يختلف الحقل الإجهادي المتشكل تحت الأسنان وفقاً لتصنيف الصخر ميكانيكياً، سنتناول في هذا البحث الصخور المتجانسة تناظرياً (المتناظرة عرضياً)، و ندرس الحقل الإجهادي أثناء انغراس السن فيها وفق اتجاهين مختلفين (موازي و متعامد) نسبة لمحور الدوران لهذا الصخر. ان الدراسات التقليدية لهذه الظاهرة تعتبر محدودة القدرة لعدم امكانية معرفة كافة القيم الإجهادية المتغيرة لحظياً تحت السن في الصخر. اعتمدنا في هذه الدراسة على علم النمذجة و المحاكاة لقدرته على اظهار النتائج بشكل جيد و المخططات اللازمة في اي لحظة أثناء انغراس السن في القاع. تم الاعتماد على نموذج ثلاثي البعد للصخر و سن أسطوانى مسطح، و قمنا بمحاكاة عملية انغراس السن داخل الصخر ثم حركته الجانبية و جرف الصخر. تبين لنا أن التفتيت في الحالة (PAR) أكثر سهولة من الحالة (PER) نتيجة لخواص التناظر للصخر.

الكلمات المفتاحية: إجهادات، صخر متناظر عرضياً، محاكاة.

1- أستاذ مساعد في / كلية الهندسة الكيميائية و البترولية / جامعة البعث

Study of the stress state for transversely isotropic rocks during the implantation of teeth bit

Summary:

Summed up the drilling process by the fragmentation of the rock by the teeth of bit which implants under the load applied to the teeth as part of the weight of drill collars . The study of the stresses field under the tooth of bit and so under the overall teeth on the bottom is crucial from the viewpoint of the petroleum rock mechanics. The stress field formed under the teeth differs according to the rock classification mechanically. In this research, we deal with transversely isotropic rock, and we study the stress field during the implantation of the tooth bit according to two different directions (parallel and perpendicular) relative to the axis of rotation of this rock. The traditional studies of this phenomenon are considered limited in capacity because it is not possible to know all the varying stress values of momentary variability under the tooth. In this study, we relied on the science of modeling and simulation for its ability to show results well and the necessary plans at any moment during the implantation of the tooth. A three-dimensional model was adopted for rock and a flat cylindrical tooth, we simulated the implantation of the tooth inside the rock, then its lateral movement.. It turns out that fragmentation according to the case (PAR) is easier than the case (PER) due to symmetry properties of the rock.

Keywords: stresses, transversely isotropic rocks, simulation.

1- مقدمة :

يصادفنا عند حفر آبار النفط و الغاز صخوراً مختلفة في تركيبها الليتولوجي، تتميز هذه الصخور بمواصفات ميكانيكية مختلفة أيضاً.

يتم تصنيف الصخور ميكانيكياً إلى ثلاثة أنواع رئيسية [1] [2]:

1- صخور متناظرة عمودياً 2- صخور متناظرة عرضياً 3- صخور متجانسة ميكانيكياً. لكلٍ من هذه الأنواع الثلاثة مواصفات و سلوكيات مختلفة عند محاولة تفتيتها بأسنان رؤوس الحفر.

عند انغراس الاسنان في الصخر تتشكل مخاريط إجهادية ذات شكل مميز، مشكلةً نواة للتفتيت تتطور بشكل تدريجي وصولاً إلى تفتيت الصخر.

إن دراسة الحقل الإجهادي تحت السن تساهم في معرفة العلاقة المتبادلة بين السن و الصخر و تساهم في فهم آليات التفتيت بشكل افضل. تتميز الصخور المتناظرة عرضياً بمستوى تتساوى فيه الخواص الميكانيكية و تختلف عن المحور العمودي عليه (محور الدوران). من الممكن و عند حفر هذا النوع من الصخور أن يكون محور السن موازياً أو عمودياً على محور الدوران لهذا الصخر.

2- هدف البحث:

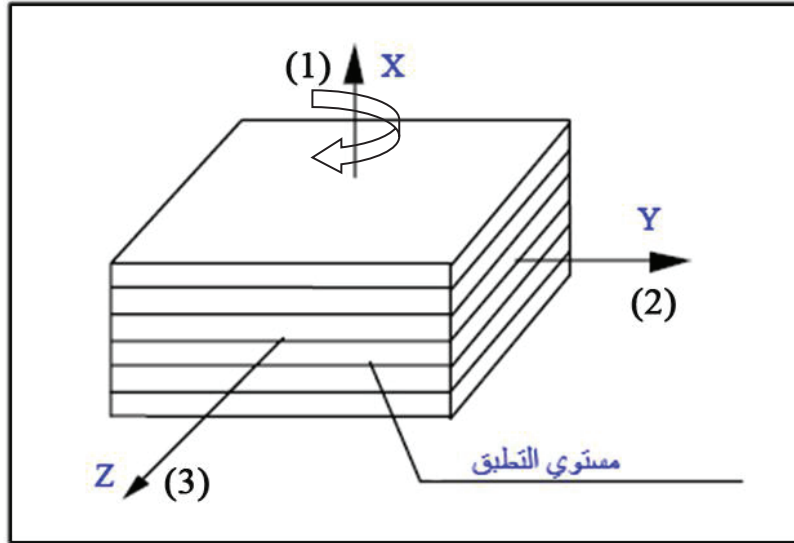
يهدف البحث إلى دراسة الحقل الإجهادي تحت السن عند حفر الآبار للصخور المتناظرة عرضياً، و ذلك عن طريق استخدام علم النمذجة و المحاكاة لعملية دخول السن في الصخر حيث تم محاكاة حركة السن المعدني في الصخر وفق اتجاه موازٍ لمحور الدوران في الحالة الأولى ثم وفق اتجاه عمودي عليه في الحالة الثانية.

3- مواد و طرائق البحث:

استخدمنا في هذا البحث علم النمذجة و المحاكاة و ذلك من خلال تصميم و بناء نموذج ثلاثي البعد لعملية دخول السن في الصخر ومن ثم تطبيق المؤثرات المختلفة على هذا النموذج معتبرين ثلاث مراحل متتابعة: الأولى و هي انغراس السن في الصخر و الثانية هي انزياح السن جانبياً، أخيراً رفع السن نحو الأعلى.

4- تمهيد نظري عن الصخور المتناظرة عرضياً [1] [2]:

هي عبارة عن صخور متناظرة عمودياً و تملك بالإضافة لذلك محور دوران و تناظر الشكل (1) أي إذا أجرينا أي عملية دوران حول هذا المحور يجب أن تبقى مواصفات المادة و المصفوفة ثابتة .



الشكل (1) المواد المتناظرة عرضياً

تمتلك هذه الصخور مستوي تطبيق يتعامد مع محور الدوران.

يمكن التعبير عن مصفوفة تنسور الصلابة لهذه الصخور بالشكل التالي:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$

حيث :

$$C_{55} = C_{44} , C_{66} = \frac{1}{2}(C_{22} - C_{23}) , C_{13} = C_{12} , C_{33} = C_{22}$$

نلاحظ أنه لدينا خمسة ثوابت مستقلة يجب تحديدها و من خلال المصفوفة يمكننا و بسهولة تمييز أن محور الدوران هو المحور (X) أو المحور (1).

و أما مصفوفة المرونة للصخر المتناظر عرضياً فتكتب بالشكل التالي:

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{23} & S_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} \end{bmatrix}$$

حيث :

$$S_{22} = S_{33} , S_{12} = S_{13}$$

$$S_{55} = S_{44} , S_{66} = 2(S_{22} - S_{23})$$

و نذكر هنا بارامترات المرونة اللازم تحديدها و هي:

E_1 : يعبر عن معامل يونغ للمرونة وفق محور الدوران (1 أو x).

$E_2 = E_3$: يعبر عن معامل يونغ للمرونة في المستوى (32 أو YZ) العمودي على محور الدوران (1 أو x).

ν_{12} : معامل بواسون بين محور الدوران و المستوى (23).

ν_{23} : معامل بواسون بين المحورين 2 و 3.

G_{12} : معامل القص الموافق للمحورين 12

G_{23} : معامل القص بين محوري المستوى 2 و 3 و يتم حسابه بمساعدة البارامترات المرنة

ضمن نفس المستوى (E_2 و ν_{23}).

5. القسم العملي:

للقيام بعملية النمذجة و المحاكاة يجب تنفيذ المراحل التالية: [4] [3]:

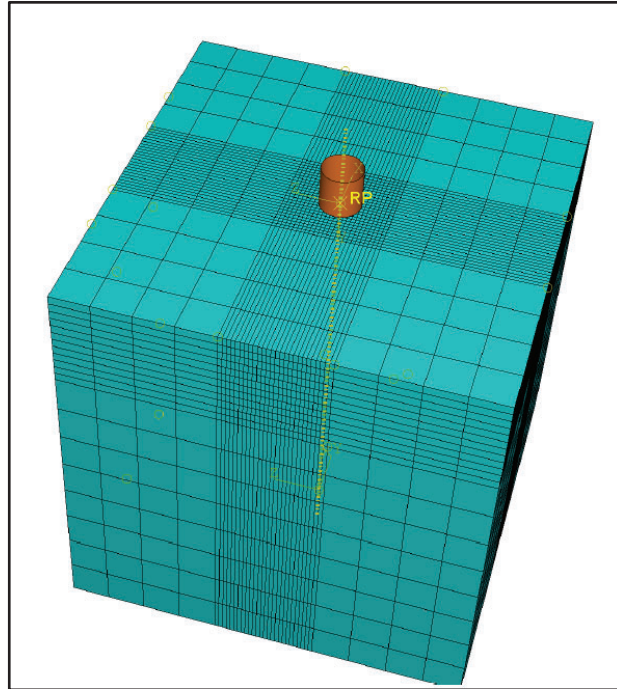
- 1- بناء النموذج الهندسي (الجيومتري) للظاهرة المدروسة.
 - 2- تحديد قانون تصرف المادة المراد استخدامه وتحديد عناصره و متغيراته.
 - 3- تحديد المراحل المختلفة لتطبيق القوى المؤثرة.
 - 4- تحديد العلاقة بين مختلف أجزاء النموذج الهندسي (عندما يتألف من أكثر من جزء).
 - 5- تحديد الشروط الحدية على حدود النموذج الهندسي (الجيومتري) من انتقالات و قوى.
 - 6- بناء الشبكة الهيكلية للنموذج الهندسي (تقسيم النموذج الهندسي إلى عناصر منتهية).
 - 7- تنفيذ عملية النمذجة وإخراج النتائج.
- لقد استخدمنا بيئة للنمذجة تسمى (ABAQUS) و تعتبر من البيئات الجيدة لإجراء عمليات النمذجة و المحاكاة بطريقة العناصر المنتهية (FEM).
- الصخر المدروس هنا هو الصخر الغضاري (argilite de Tournemire) و هو مثال عن الصخور المتناظرة عرضياً [5].

قمنا باستخدام نموذج مرن لهذا الصخر و بالتالي نحتاج لخمس بارامترات مرنة مرتبة في الجدول الآتي [5]:

الجدول (1) قيم البارامترات المرنة المستخدمة في عملية المحاكاة

اسم البارامتر	$E_1(Mpa)$	$E_2(Mpa)$	ν_{12}	ν_{23}	$G_{12}(Mpa)$
القيمة	7500	21500	0.14	0.15	4300

يبين الشكل (2) الشكل الهندسي للسن المسطح و الصخر المدروسين، و هو عبارة عن نموذج ثلاثي الأبعاد. يجب التنويه بأن أبعاد الشكل تعتمد على أبعاد السن و لكن و بشكل عام يجب أن تكون أبعاد الصخر أكبر بخمس مرات على الأقل من أبعاد السن المستخدم و ذلك كي نتمكن من تسهيل الفرضيات بالنسبة للشروط الحدية عند حدود النموذج. اعتمدنا في حالتنا أبعاد للصخر أكبر بعشر مرات تقريباً من أبعاد السن.



شكل (2) يبين الشكل الهندسي للسن و الشبكة الهيكلية المسطح المستخدم في المحاكاة

تم اعتماد قياس قطر السن 2 ملم وفرض عملية دخول شاقولية للسن الى مسافة تساوي 0.5 ملم، ثم إزاحته جانبياً لمسافة 0.5 ملم أيضاً، و أخيراً تم رفع السن شاقولياً وصولاً إلى سطح الصخر.

في الخطوة اللاحقة يتم تصميم و اختيار الشبكة الهيكلية حيث أننا كثفنا هذه الشبكة بجوار و تحت سن رأس الحفر بهدف تمثيل أدق لتوزيع الإجهادات تحت السن و بجواره. يبين الشكل (2) هذه الشبكة المستخدمة.

و يتم انجاز النمذجة وفق حالتين و لكل حالة ثلاثة مراحل:

الحالة الأولى: السن عمودي على مستو التطبيق (PER)، و يوازي محور الدوران للصخر . أي أن السن سوف ينغرس وفقاً للمحور X أو 1. لاحظ الشكل(1).

الحالة الثانية: السن مواز لمستو التطبيق (PAR)، و عمودي على محور الدوران للصخر. أي أن السن سوف ينغرس وفقاً للمحور Y أو 2 .

و المراحل الثلاثة هي:

المرحلة الأولى: حيث يتم غرس السن في الصخر تدريجياً إلى العمق الذي تم اختياره (0.5 ملم).

المرحلة الثانية : يتم ازاحة السن جانبياً بمقدار 0.5 ملم.

المرحلة الثالثة: رفع السن حتى الوصول لسطح الصخر.

ثم تمت المقارنة بين الحالة الإجهادية المتشكلة تحت السن في هاتين الحالتين.

5. النتائج ومناقشتها :

بعد تطبيق عملية النمذجة وحساب حقول تساوي الإجهادات نختار إظهار النتائج التالية:

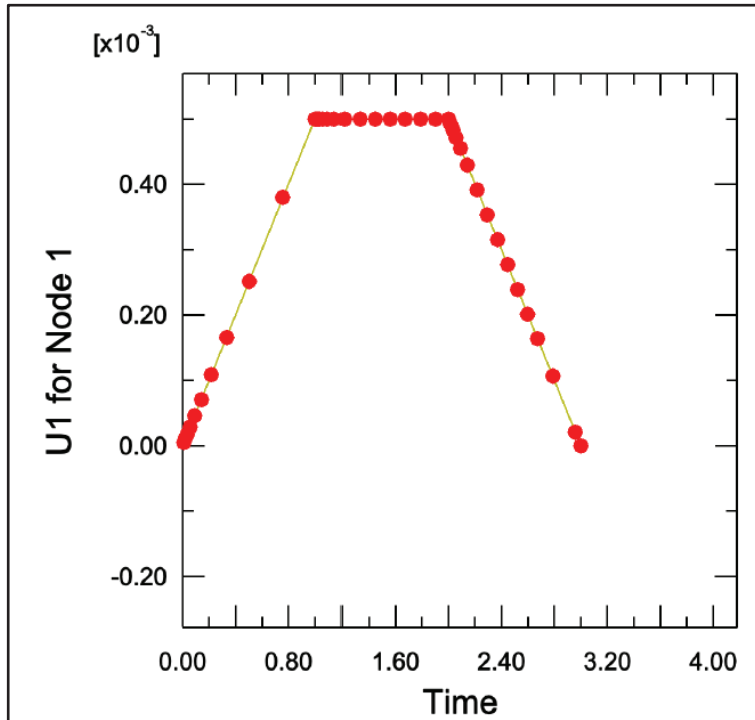
1- تغير قيمة الانتقال للسن أثناء المراحل الثلاثة للحالتين (PER) و (PAR) بالعلاقة مع زمن انجاز عملية المحاكاة. لاحظ الشكل (3) و الشكل (4).

2- الحالة الإجهادية تحت السن في المراحل التالية:

أ- بداية الانغراس. ب- نهاية الانغراس (بداية الانزلاق). ج- نهاية الانزلاق. د- نهاية رفع السن نحو سطح الصخر. من الشكل (5) و حتى الشكل (12).

اخترنا إظهار النتائج بشكل فراغي و ثنائية البعد و من منظور مواز لمحور الانغراس لمعرفة توزيع الإجهادات وفق الاتجاهات المختلفة.

سوف نقوم بتحليل النتائج و مناقشتها من وجهة نظر نوعية و كمية (الجدول (2)).

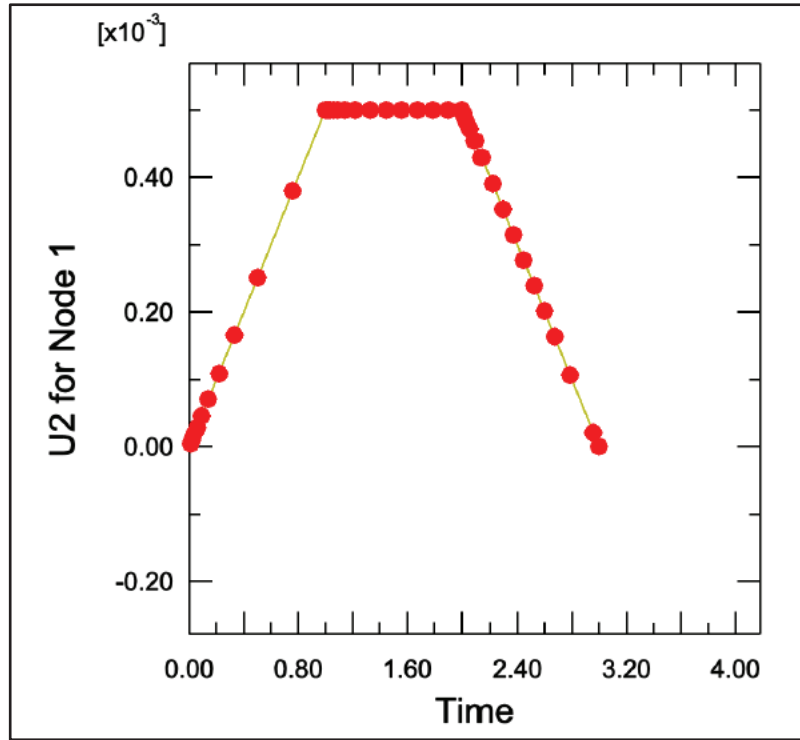


الشكل (3) تغير قيمة الانتقال للسن أثناء المراحل الثلاثة للحالة (PER)

نلاحظ في الشكل (3) تغير قيمة الانتقال على المحور 1 المتعامد مع مستوي التطبيق وصولاً للعمق المقرر 0.5 ملم ثم يتم إزاحة السن جانبياً وفق المحور 2 بمقدار 0.5 ملم (دون تغيير قيمة الانغراس)، و أخيراً يتم رفع السن نحو سطح الصخر و بالتالي تتناقص قيمة الانتقال وفق المحور 1 حتى الصفر.

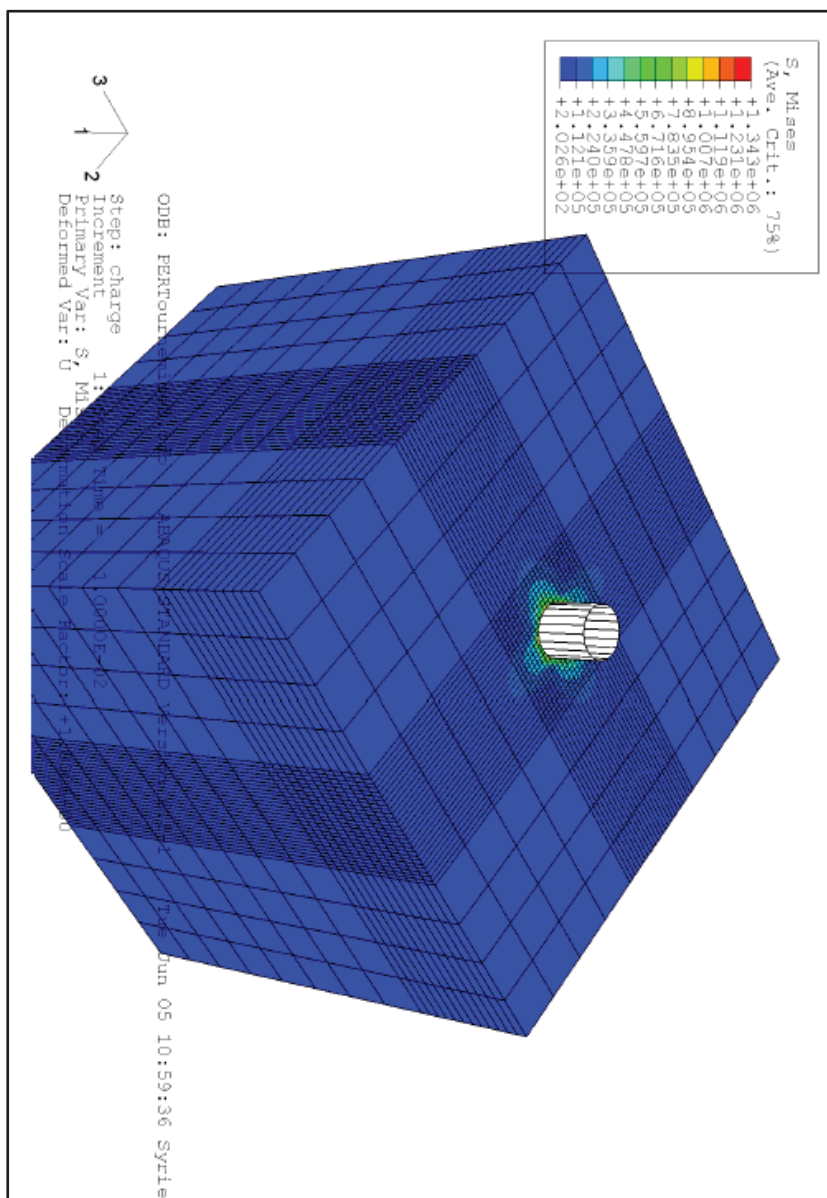
تم التعبير عن تغير الانتقال بالعلاقة مع زمن الذي استغرقته عملية الحساب للمحاكاة (بالساعات).

في الشكل (4) نلاحظ نفس ترتيب المراحل مع ملاحظة الاختلاف بأن الانغراس يتم وفق المحور 2 (PAR) و الانزلاق يتم وفق المحور 1.

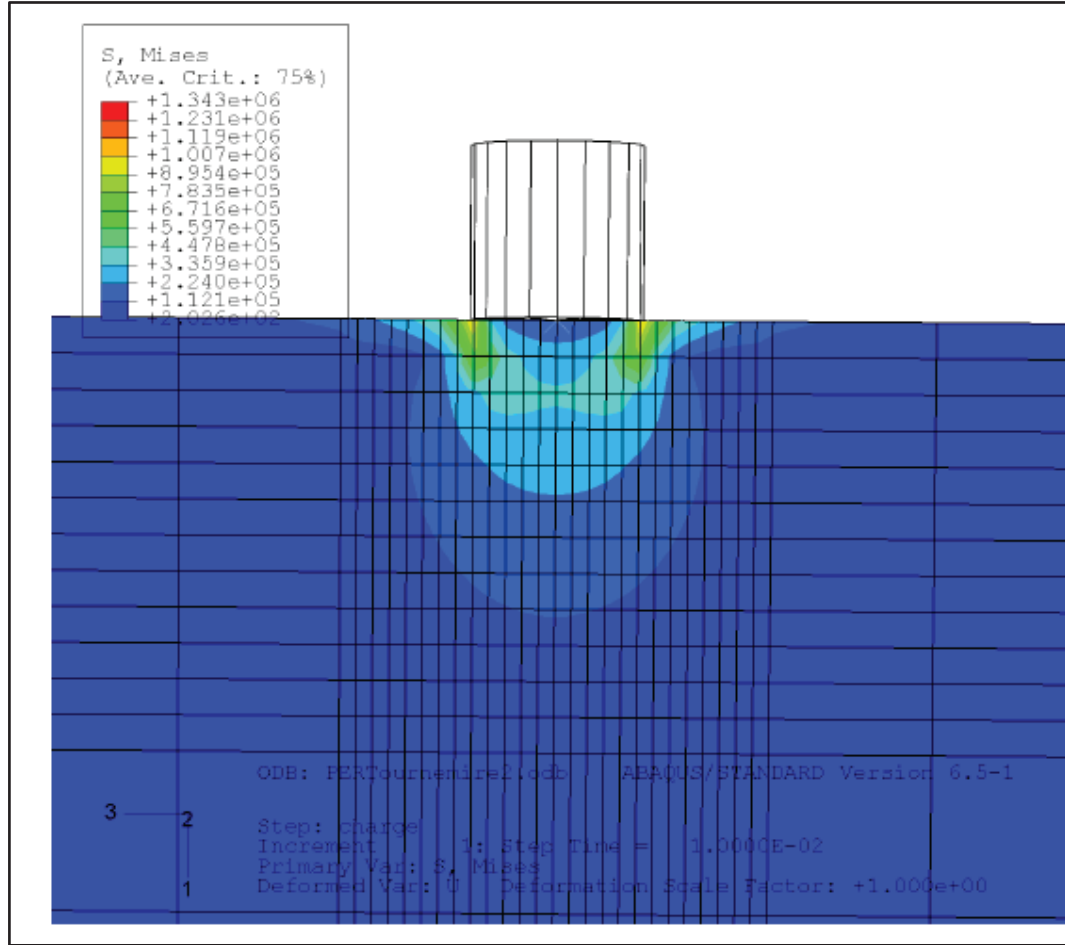


الشكل (4) تغير قيمة الانتقال للسن أثناء المراحل الثلاثة للحالة (PAR)

نستعرض فيما يأتي نتائج عملية المحاكاة بإظهار الحقول الإجهادية تحت السن في مرحلته المختلفة.



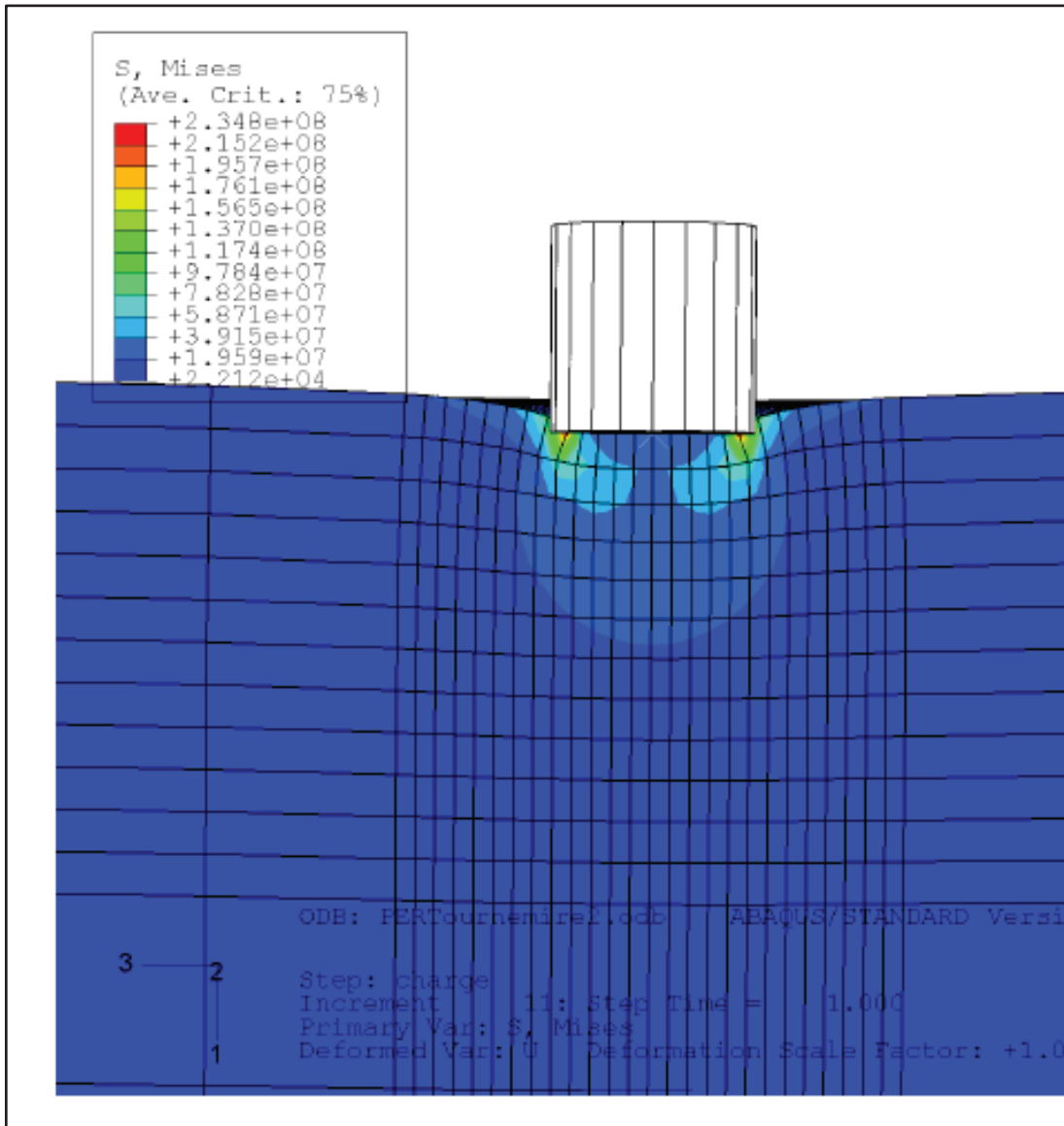
الشكل (5) الحالة الإجهادية للصخر تحت السن عند بداية الانغراس للحالة للحالة (PER) (منظور ثلاثي الأبعاد)



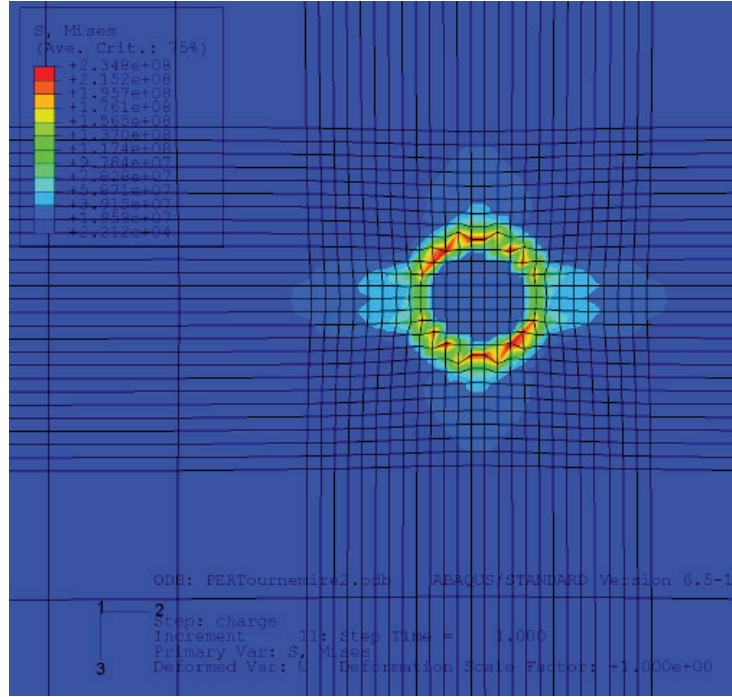
الشكل (6) الحالة الإجهادية للصخر تحت السن عند بداية الانغراس للحالة للحالة (PER) (منظور جانبي)

نلاحظ من الشكلين 5 و 6 كيفية بدء تشكل المخاريط الإجهادية تحت السن و تتميز بقيم صغيرة بحدود 1.3 ميغا باسكال كقيمة عظمى.

يبين الشكل (7) و الشكل (8) الحالة الإجهادية تحت السن بنهاية الانغراس و نلاحظ بشكل واضح كيفية تمركز الاجهادات و زيادة القيم حتى 235 ميغا باسكال.

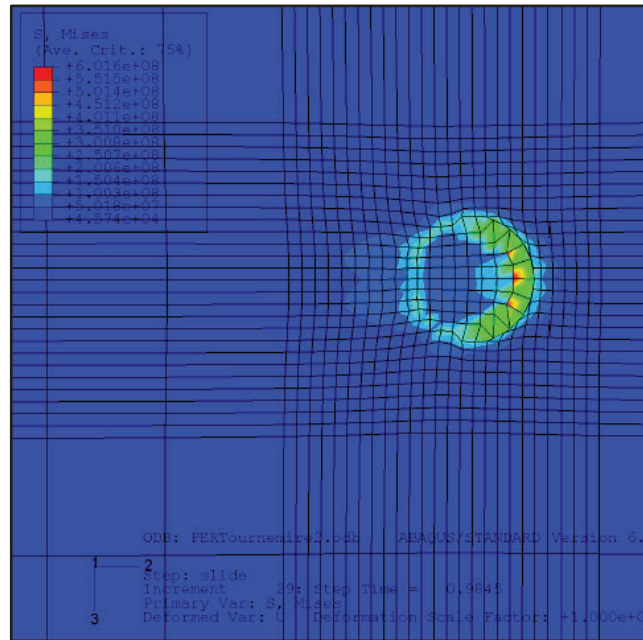


الشكل (7) الحالة الإجهادية للصخر تحت السن عند نهاية الانغراس للحالة (PER) (مقطع جانبي)

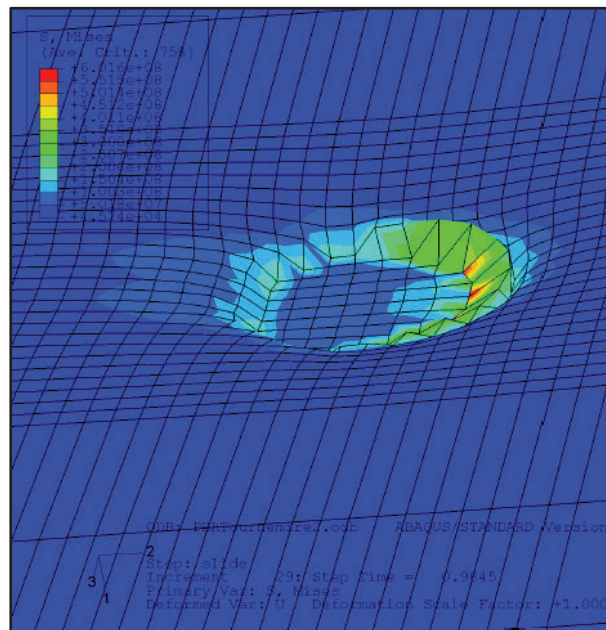


الشكل (8) الحالة الإجهادية للصخر تحت السن عند نهاية الانغراس للحالة (PER) (منظور علوي)

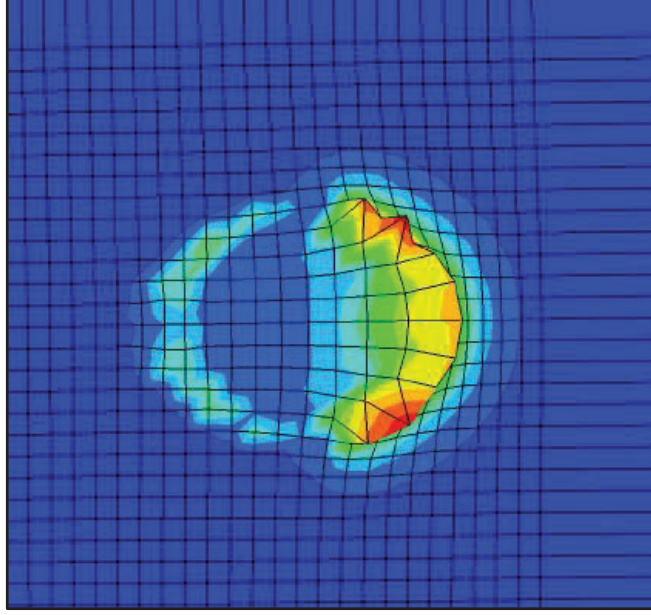
ينزلق السن بعدها وفق المحور 2 و نلاحظ بوضوح على الشكل (9) و الشكل (10) كيفية تغير تموضع الحالة الإجهادية باتجاه حركة السن و الأكثر أهمية هي ملاحظة الارتفاع الكبير في قيم الإجهادات حيث تصل في قيمتها العظمى حتى 600 ميغا باسكال. نذكر هنا أن الفرضية التي استخدمناها هي فرضية الصخر المرن و إلا فإن هذه القيمة من الإجهاد ستترافق بتفتيت للصخر بشكل أكيد.



الشكل (9) الحالة الإجهادية للصخر تحت السن عند نهاية الإنزلاق للحالة (PER) (منظور علوي)



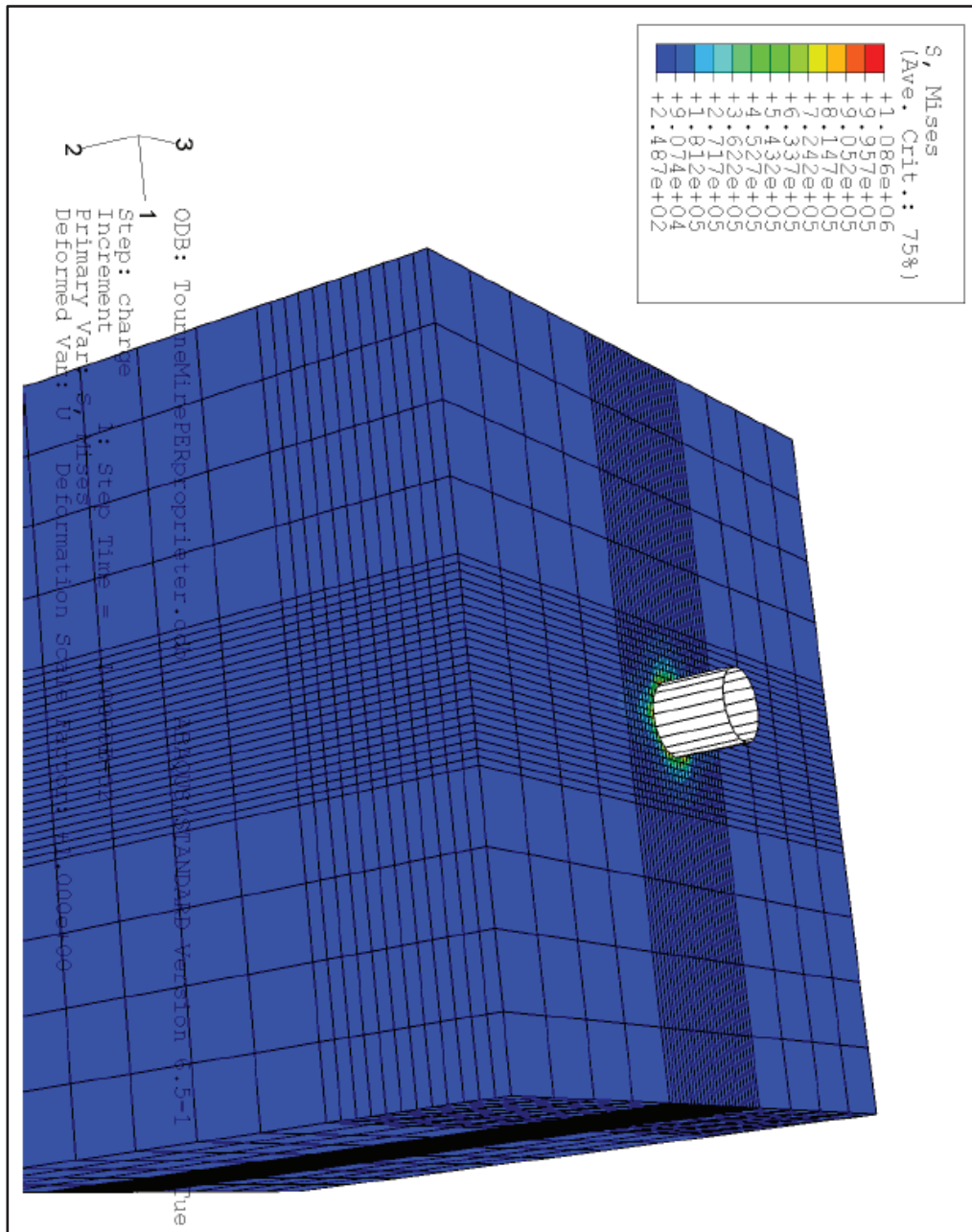
الشكل (10) الحالة الإجهادية للصخر تحت السن عند نهاية الإنزلاق للحالة (PER) (منظور فراغي)



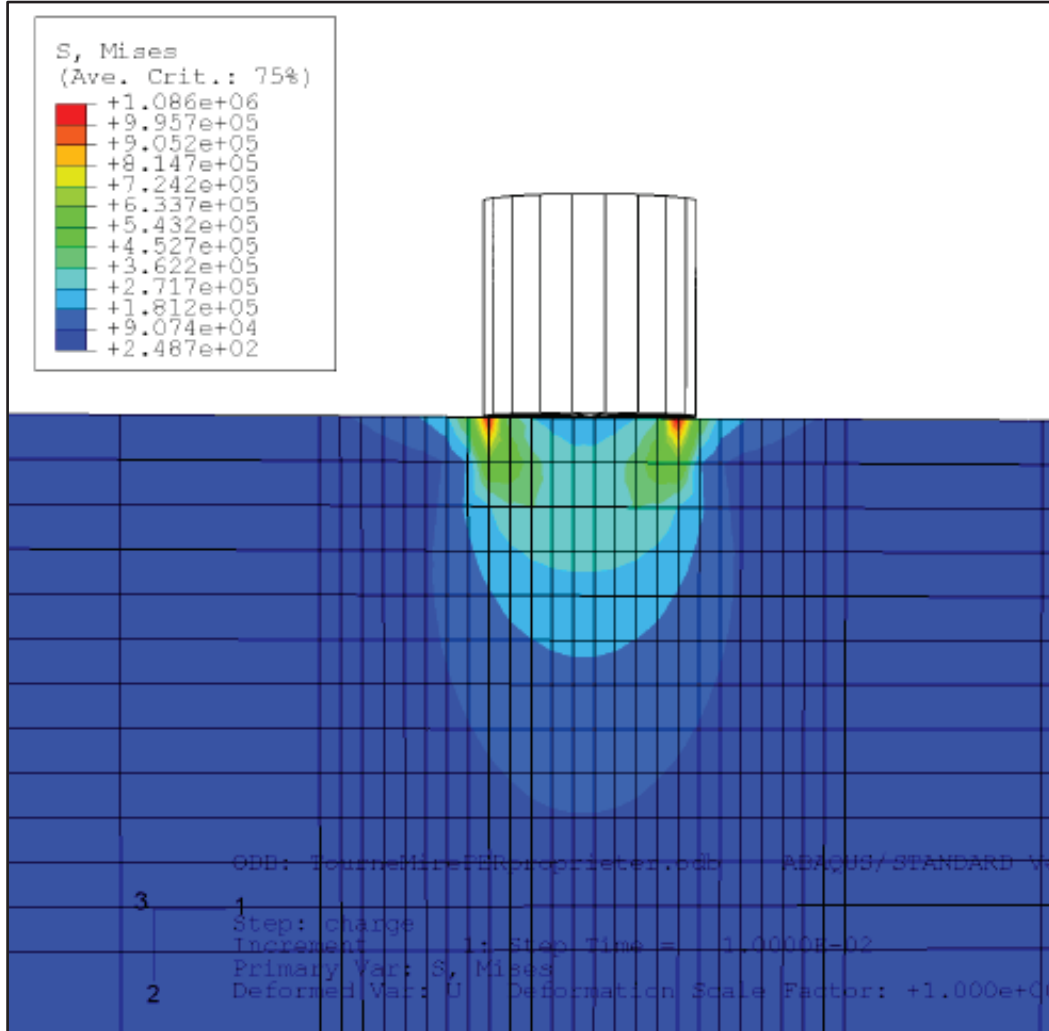
الشكل (11) الحالة الإجهادية للصخر تحت السن بعد رفع السن لسطح الصخر للحالة (PER)

يبين الشكل (11) شكل الحقل الإجهادي بعد رفع السن نحو سطح الصخر حيث نلاحظ الإجهادات المتبقية نتيجة لجرف الصخر أمام السن (القسم اليميني من الشكل) و تتراوح قيم هذه الاجهادات بحدود 20 ميغا باسكال مع ملاحظة ارتفاع الصخر نتيجة جرفه من قبل السن.

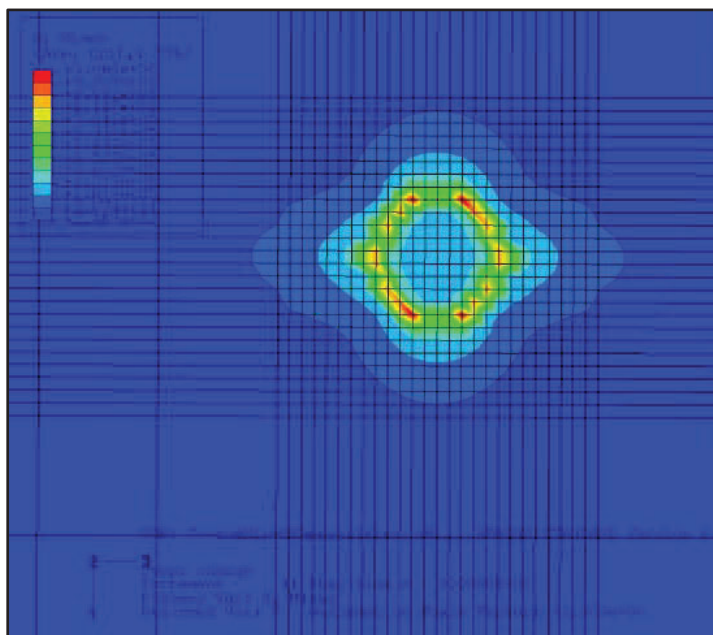
إن الأشكال من الشكل (12) و حتى الشكل (19) توضح الحقول الإجهادية تحت السن خلال المراحل المتعددة و لكن في حالة (PAR) أي أن الانغراس يتم وفق المحور 2 الموازي لمستوي التطبيق و الانزلاق يتم وفق المحور 1 المتعامد معه.



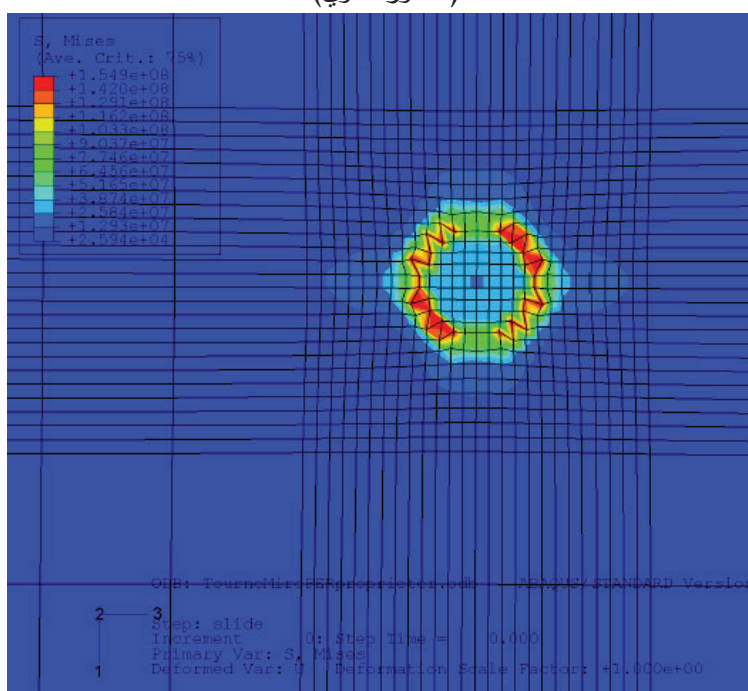
الشكل (12) الحالة الإجهادية للصخر تحت السن عند بداية الانغراس للحالة (PAR) (منظور فراغي)



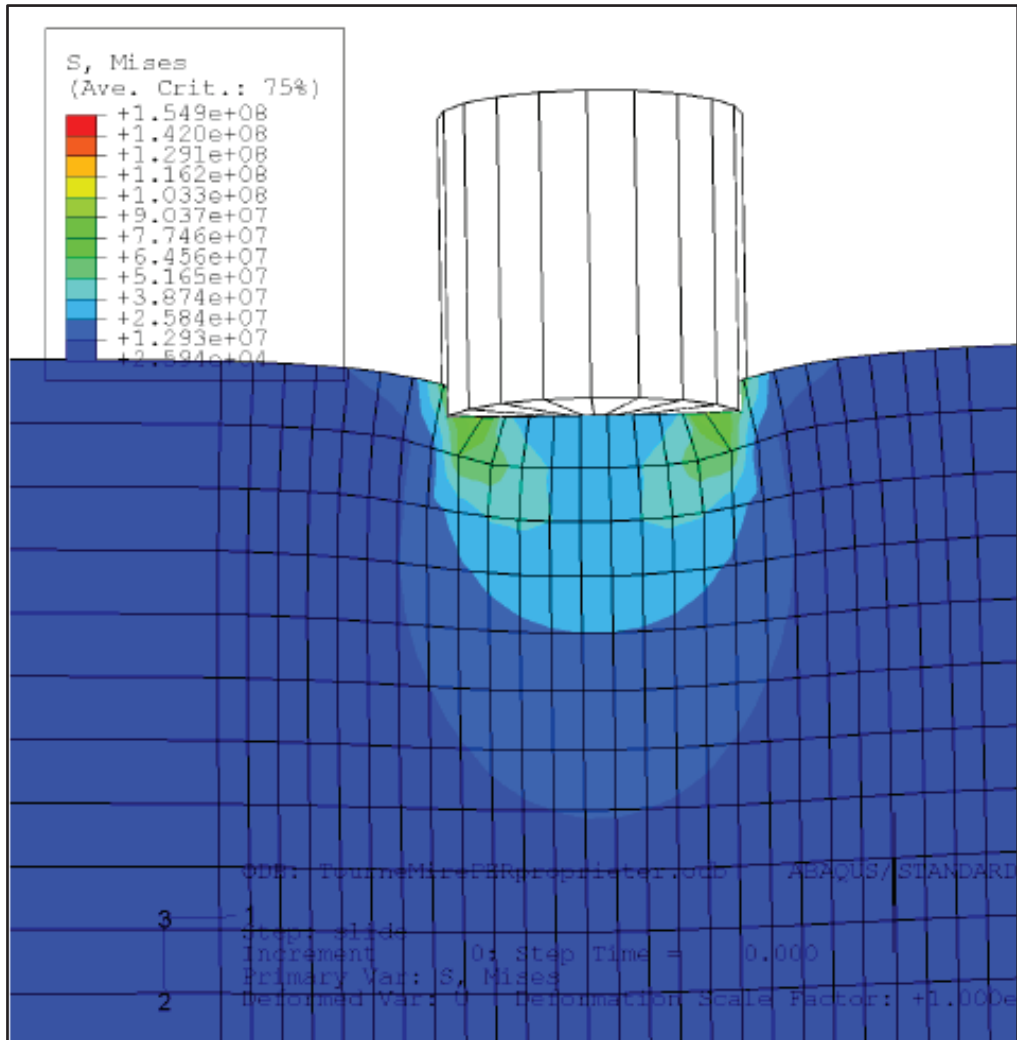
الشكل (13) الحالة الإجهادية للصخر تحت السن عند بداية الانغراس للحالة للـ (PAR)
(منظور جانبي)



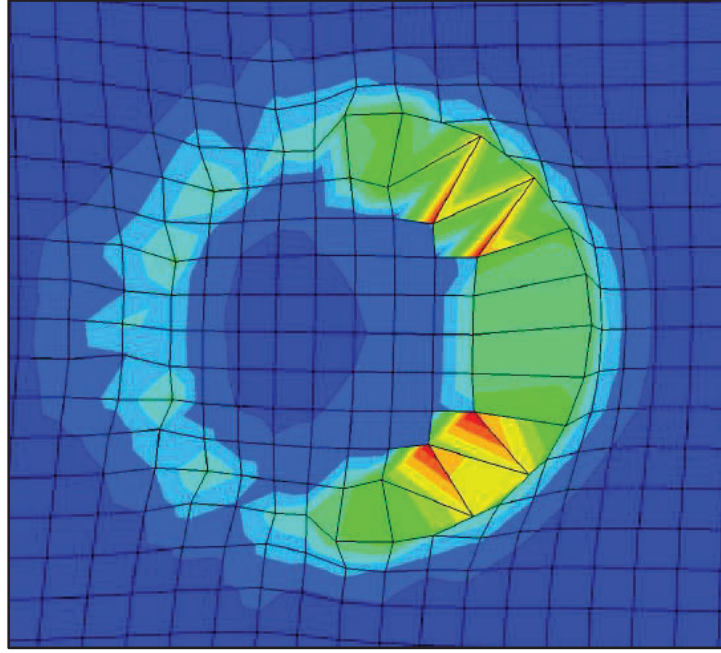
الشكل (14) الحالة الإجهادية للصخر تحت السن عند بداية الانغراس للحالة للـ(PAR)
(منظور علوي)



الشكل (15) الحالة الإجهادية للصخر تحت السن عند نهاية الانغراس للحالة للـ(PAR)
(منظور علوي)



الشكل (16) الحالة الإجهادية للصخر تحت السن عند نهاية الانغراس للحالة (PAR)
(منظور جانبي)

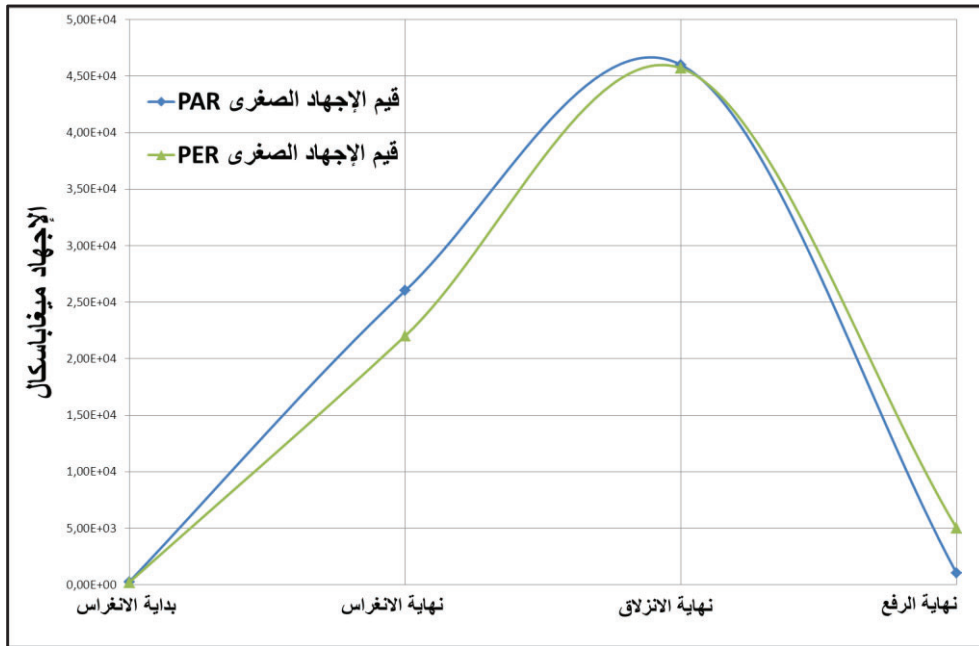


الشكل (19) الحالة الإجهادية للصخر تحت السن بعد رفع السن لسطح الصخر للحالة (PAR) (منظور علوي)

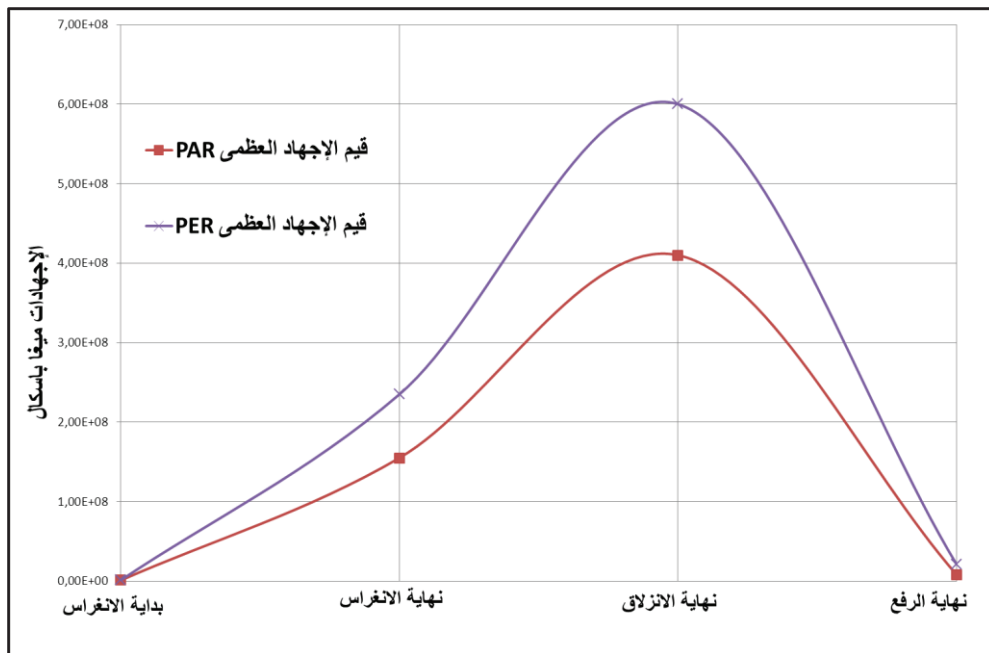
نبين في الجدول (2) و في الشكل (20) و الشكل (21) النتائج الكمية لقيم الإجهادات تحت السن خلال الحالات المختلفة.

الجدول (2) النتائج الكمية لقيم الإجهادات تحت السن خلال الحالات المختلفة

قيمة الإجهاد في الحالة (PER)		قيمة الإجهاد في الحالة (PAR)		المرحلة
القيمة العظمى (Pa)	القيمة الصغرى (Pa)	القيمة العظمى (Pa)	القيمة الصغرى (Pa)	
$1,3 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^2$	$1,08 \cdot 10^6$	$2,48 \cdot 10^2$	بداية الانغراس
$2,35 \cdot 10^8$	$2,2 \cdot 10^4$	$1,55 \cdot 10^8$	$2,6 \cdot 10^4$	نهاية الانغراس
$6 \cdot 10^8$	$4,57 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^8$	$4,6 \cdot 10^4$	نهاية الانزلاق
$2 \cdot 10^7$	$0,5 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^6$	$0,1 \cdot 10^4$	نهاية الرفع



الشكل (20) قيم الإجهادات الصغرى تحت السن خلال الحالتين PAR و PER



الشكل (21) قيم الإجهادات العظمى تحت السن خلال الحالتين PAR و PER

من مقارنة الأشكال السابقة في الحالتين خلال المراحل المختلفة و مقارنة القيم الاجهادية يمكن الخلوص إلى عدد من الاستنتاجات و التوصيات التالية:

الاستنتاجات والتوصيات :

1- إن حجم و انتشار الحقل الإجهادي تحت السن يكون أكبر و أقل عمقاً في الحالة (PER) من الحالة (PAR) المعيرة عن انغراس السن بشكل مواز للتطبيق.

2- إن قيم الإجهادات العظمى الناشئة تكون أكبر في حالة انغراس السن بشكل عمودي على مستو التطبيق (PER) مقارنة بالحالة (PAR).

3- يتم و بشكل واضح جرف الصخر أمام السن و زيادة المقاومة أمامه و بالتالي زيادة الحالة الإجهادية في نهاية مرحلة الانزلاق.

4- يحتفظ الصخر في نهاية مرحلة الرفع بقيم إجهادية متبقية ناتجة عن عملية الانغراس و جرف الصخر التي تمت مسبقاً.

يمكننا تفسير مجمل الاستنتاجات السابقة بشرح كيف تتم عملية الانغراس و علاقتها ببنية الصخر المتجانس عرضياً.

يتمتع هذا الصخر بمستويات تطبيق تتميز بتجانس الخواص الميكانيكية فيها مع اختلافها عن المواصفات الميكانيكية وفق محور الدوران.

عند انغراس السن بشكل متعامد مع مستوي التطبيق سوف تحدث حالة تشبه ارتصاص مستويات التطبيق و هذا يؤدي لانتشار حقول الإجهاد بشكل أكبر و تبدي هذه المستويات مقاومة أكبر أمام السن، و عند اكتمال الانغراس و بداية عملية الانزلاق يحاول السن سحب الصخر و دفعه أمامه و هذا ينتج مقاومة كبيرة جداً أمام السن (600 ميغا باسكال).

أما بالنسبة للحالة الثانية و عند كون السن ينغرس بشكل مواز لمستوي التطبيق فنلاحظ انتشار الحقل الإجهادي بشكل أكبر نحو العمق (الشكل (13))، و تتميز الإجهادات بقيم أقل من الحالة (PER) و ذلك لأن السن يحاول إزاحة المستويات و فصلها عن بعضها نتيجة الضغط عليها و تشوهها جانبياً.

تستمر هذه الظاهرة و تبدو واضحة في مرحلة الانزلاق حيث تكون قيم الاجهادات (400 ميغا باسكال) في نهاية الانزلاق أقل بحدود 30 بالمائة من الحالة المتعامدة (PER).
نذكر أخيراً أن معظم الصخور المتناظرة عرضياً مثل الغضار و الشيست تتميز ببنية وريقية تتناسب مع مستوي التناظر الميكانيكي.
نوصي في نهاية هذا البحث باستكمال العمل على حالات بين المتعامدة و المتوازية و ذلك لمحاكاة عملية انغراس و تقدم راس الحفر عند حفر الطبقات الجيولوجية المتطبقة المائلة، أو في عمليات الحفر الموجه.

6. المراجع العلمية:

- 1- د. نضال إبراهيم، 2020. ميكانيك تفتيت الصخور. منشورات جامعة البعث-كلية الهندسة الكيميائية و البترولية.
- 2- Fjaer E. et al, 2008. Petroleum Related Rock Mechanics, 2nd Ed. 515p.
- 3- Schechter.R, 1992. Oil well simulation , University of Texas,312p.
- 4- Springman S, 2009. Modelling in geotechnics. Institute of Geotechnical Engineering, 175p.
- 5- NIANDOU H, 1994. Etude du comportement rhéologique et modélisation de l'argilite de Tournemire : Application a la stabilité d'ouvrages souterrains. Ph .D. Thesis, Université de Lille 1.