

تحليل سلوك الأوساط الصخرية لأخذ ظاهرة زيادة الحجم بالحسبان بعد مقاومة القص الأعظمية

الدكتور إبراهيم حمود*

(تاريخ الإيداع 28 / 6 / 2010. قُبِلَ للنشر في 8 / 11 / 2010)

□ ملخص □

هدف البحث: دراسة سلوك الوسط الصخري المحيط بالنفق المحفور لإدخال أثر ظاهرة زيادة الحجم بعد تجاوز مقاومة القص الأعظمية في قانون السلوك المرن - اللدن المراد استخدامه في التحليل للنمذجة العددية. وذلك لإيضاح الحاجة لمثل هذا السلوك المعدل في تحليل الوضع الإجهادي لتأمين تصميم مادة التدعيم الأولي في الأنفاق العميقة. طرق البحث: قمنا بدراسة السلوك المرن - اللدن للأوساط الصخرية اللازم لإدخال أثر ظاهرة زيادة الحجم وذلك بإجراء التحليل العددي لنتائج تجربة الضغط ثلاثي المحاور على العينات الصخرية الممثلة لهذا الوسط باستخدام برنامج EXCEL. كما وقمنا بمقارنة نتائج النمذجة العددية للأنفاق التي تم تنفيذها وتصميمها باستخدام معيار Mohr-Coulomb للانهيار مع القياسات الحقلية.

النتائج: استطعنا استخراج البارامترات اللازمة لنمذجة سلوك الوسط آخذين بعين الاعتبار ظاهرة زيادة الحجم بعد تجاوز المقاومة الأعظمية وكتابة الخوارزمية واللوغاريتم لقانون السلوك المعدل والتي تظهر مناطق التشوهات المختلفة. هذه النتائج سوف تساعدنا مستقبلاً في النمذجة العددية باستخدام برامج العناصر المحدودة المختلفة لتصميم آمن لمادة التدعيم وللحد من تشققات الوسط الصخري المحيط بالنفق.

الكلمات المفتاحية: ميكانيك صخور، قانون سلوك، أنفاق، نمذجة عددية.

*مدرس - قسم الهندسة الجيوتكنيكية - جامعة دمشق - سورية.

Behavior Analysis of Rocky Medium After Reaching Maximum Sheering Capacity Taking into Consideration Dilatancy Phenomena

Dr. Ibrahim Hammoud*

(Received 28 / 6 / 2010. Accepted 8 / 11 / 2010)

□ ABSTRACT □

Objective: This work aimed to study the behavior of the Rocky medium enclosing drilled tunnel and to include the effect of the dilatancy phenomena after exceeding the Max sheering stress and in the elastic-plasticity behavior formula which intended to be used in the Numerical modeling, to finally decide the need of such proposed behavior for the stress analysis in order to design the support material for the deep tunnels.

Methods: We studied the behavior parameters through the Numerical analysis of the Lab experiments results of the Tri Axial test on the Rocky Samples representing this medium using Excel Program. We also compared the Numerical modeling results of the tunnels which are designed and executed using Mohr- Coulomb Failure parameter with the field measurements.

Results: We defined the parameters requested for the modeling of the medium behavior taking into account the dilatancy phenomena after exceeding the Max sheering stress.

We also wrote an Algorithm for modified behavior rule showing the different deformation regions. These results will help us in the future in Numerical modeling using different Finite Elements to reach a safety design for the support material and to limit the ruptures of the rocky medium.

Key words: Rock mechanic, Behavior Laws, Tunnel, simulation.

*Assistant Professor, Department of Geotechnical Engineering, Damascus University , Syria.

مقدمة:

النفق الذي تمت دراسته يمر بمنطقة طبوغرافية معقدة نسبياً ومجهد. منذ البداية كانت عمليات الحفر في منطقة المارل مترافقة مع انتقالات كبيرة تم قياسها على محيط النفق. هذه الانتقالات الكبيرة جعلتنا نأخذ الاحتياطات اللازمة من خلال وضع مادة تدعيم أولي من البيتون المقذوف ورغم ذلك استمرت زيادة التشوهات وأدت إلى ظهور مستمر للتشققات في طبقة البيتون المقذوف عند قمة النفق. هذه الظاهرة جعلتنا نفكر بإجراء قياس لحالة الإجهادات الأولية ضمن الوسط. من خلال القياسات وجدنا أن قيمة معامل الضغط الجانبي للوسط المحيط بالنفق هو بحدود 1.2 - 1.7، وأن الإجهادات الرئيسية شاقولية ومتعامدة مع محور النفق وهذا ما يفسر آلية الانهيار الحاصلة عند قمة النفق في مادة التدعيم الأولي وهو البيتون المقذوف والذي تعرض لضغط جانبي. إذاً لا بد من تحسين مادة التدعيم لجعلها قادرة على تحمل هذه التشوهات أو الانتقالات والتي لم تحسب جيداً وفقاً لقانون موهر - كولومب للسلوك المرن - اللدن التام وفقاً للدراسة التصميمية. لذلك وفي هذا الجزء من النفق، تم تحسين مادة التدعيم الأولي من خلال وضع شدادات محورية في قمة النفق وجوانبه وبشكل قريب من جبهة الحفر، وكانت كثافة هذه الشدادات تساوي ضعف الكثافة التصميمية حتى استطعنا الوصول إلى قيمة انتقالات مقبولة لأننا لم نفهم سلوك الوسط ولم نضع مادة التدعيم الأولي في الوقت المناسب بعد إنجاز أعمال الحفر وهذا ما أوصل إلى مرحلة تشوهات كبيرة. ورغم التحسين الذي استخدم في مادة التدعيم الأولي، وتخفيض قيم الانتقالات، فإن تشققات البيتون المقذوف استمرت. بسبب هذه المشكلة، فكرنا أن الوسط المحيط بالنفق أصبح ذا تشوهات كبيرة وأن المواصفات الفيزيائية والميكانيكية تغيرت وأصبحت منخفضة. هذا الأمر جعلنا نفكر بقانون سلوك يدخل ميكانيكيات السلوك أو تصرف العينة المختبرة تحت تأثير الضغط ثلاثي المحاور في كافة مجالات التشوه الحاصلة وخاصة ظاهرة تزايد حجم العينة، التي تبدأ عند ظهور السلوك اللاخطي للعلاقة ما بين الإجهادات والتشوهات. هذا التزايد في الحجم يستمر بالتزايد لحين ظهور تشوهات حدية في نقاط محددة. في هذه اللحظة تصبح قيمة زاوية الانتفاخ (ψ) أعظمية، وبعدها تبدأ هذه القيمة بالتناقص حتى لحظة الاندماج عند قيم التشوهات المحورية الأعظمية. عند بلوغ المقاومة الأعظمية، تبدأ مقاومة العينة الصخرية بالتناقص تدريجياً، ويكون التناقص بميل أسرع كلما كانت قيم الإجهادات الجانبية منخفضة. بعد قيمة المقاومة الأعظمية لا يمكن اعتبار الوسط الصخري للعينة مستمر. وتصرفها أو سلوكها يقاد من خلال شرط التشوهات أو من خلال شرط المقاومة في أماكن تركيز الإجهادات. إن ظهور سطح أو عدة سطوح عدم استمرارية يعني فقدان التماسك في الوسط الصخري المدروس. عندها يصبح سلوك العينة عند القمة (أي المقاومة الأعظمية) وما بعدها متعلقاً بشرط الاحتكاك وزيادة الحجم على طول سطوح عدم الاستمرارية وهذا فقط عند قيم التشوهات المحورية الكبيرة.

أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية البحث من خلال إدخال برامترات جديدة على قانون السلوك المرن - اللدن لتمثيل ظاهرة زيادة الحجم بعد مقاومة القص الأعظمية لنتمكن وبوساطة النمذجة من إظهار مناطق التشوهات الحاصلة في تجربة الضغط ثلاثي المحاور (المجالات الأربعة) في المنطقة المحيطة بالمنشآت المحفورة ضمن الأوساط الصخرية (أنفاق مثلاً) وذلك للتقليل من قيم الانتقالات والحد من تشقق الكتلة الصخرية المحيطة بالنفق الذي سيؤمن لنا الهدف من البحث وهو المقدر في حساب القوى المطبقة على مادة التدعيم الأولي بشكل آمن واقتصادي وفق مراحل تقدم أعمال الحفر.

طرائق البحث ومواده:

اعتمدت طرائق البحث على دراسة تحليلية لنتائج تجارب ثلاثي المحاور لعينات ممثلة للوسط الصخري وفهم سلوكها وتفسيره بحسب مجال التشوهات ومن ثم نمذجتها بوساطة برنامج EXCEL للحصول على البرامترات اللازمة لتطوير قانون السلوك اللازم لتمثيل سلوك الوسط الصخري المحيط بالنفق لأخذ ظاهرة زيادة الحجم بعد مقاومة القص الأعظمية. ويعد ذلك مقارنة نتائج النمذجة العددية باستخدام قانون موهر- كولومب للسلوك المرن - اللدن التام وغير معدل مع نتائج القياسات الحقلية المنفذة في الواقع على مقاطع القياس في النفق لإظهار أهمية القانون المطور، أما مواد البحث فاعتمدت على التحليل الرياضي لقوانين السلوك والتحليل الرياضي باستخدام EXCEL وكذلك استخدام وتطوير قوانين السلوك المستخدمة في برامج النمذجة العددية بطريقة العناصر المحدودة.

دراسة قانون السلوك المرن - اللدن:

يهدف قانون السلوك إلى تمثيل رد فعل الوسط الصخري تحت تأثير الحمولات في مجال التشوهات المتوسطة والكبيرة بعد تجاوز المقاومة الأعظمية. يتعرض الوسط الصخري عند الأعماق الكبيرة لاجهادات تجعل من الصعب منع دخوله في مجال التشوهات اللدنة بفعل أعمال الحفر نتيجة لتدهور خواص الصخر الميكانيكية. لذلك ومن أجل استخدام النمذجة العددية لتمثيل عملية الحفر وتحديد نوعية وأبعاد التدعيم اللازم، لا بد من استخدام قانون سلوك يكون قادراً ومن خلال الترابط ما بين برامتراته على تمثيل هذا الوضع الإجهادي للوسط الصخري بمرحلة التشوهات الكبيرة حيث أن مقدار تضيق النفق (الانتقالات على محيط النفق) والحمولات المطبقة على مادة التدعيم تتعلق بشكل مباشر بتصرف الوسط الصخري بعد تجاوزه للمقاومة الأعظمية. لدراسة السلوك، نعتمد على قوانين محددة لانخفاض مقاومة الصخر بعد الذروة وكذلك ظاهرة زيادة الحجم من أجل إمكانية تمثيل الميكانيكيات الأساسية للإنهيار التي تحكم الوسط الصخري في منطقة التشوهات المتوسطة والكبيرة.

في دراستنا هذه نفترض أن الوسط الصخري المحيط بالنفق يسلك سلوكاً مرناً خطياً حتى الذروة في المنحني الذي يمثل العلاقة ما بين الإجهاد والتشوه الشكل (1)، المعيار المعتمد في تحديد المقاومة الأعظمية هو معيار Hoek-Brown المعمم والمتمثل بالعلاقة التالية بين الإجهادات الرئيسية الفعالة [1]، [5]، [14]:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

حيث:

σ'_1 : الإجهاد الرئيسي الأعظمي الفعال عند الانهيار.

σ'_3 : الإجهاد الرئيسي الأصغري الفعال عند الانهيار.

σ_{ci} : مقاومة الضغط المحوري لعينة اسطوانية سليمة بقطر 50 mm

(Uniaxial Compression Strength).

m_b : معامل يمثل زاوية الاحتكاك للصخر ويعطى بالعلاقة:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

حيث:

m_i : معامل يمثل زاوية الاحتكاك لعينة صخرية سليمة، يتراوح بين 4 من أجل الصخر الغضاري (Claystone) و 33 من أجل الغرانيت (Granite).

GSI : معامل المقاومة الجيولوجي، يتراوح بين الصفر من أجل سطوح تشققات سيئة جدا والمائة من أجل سطوح تشققات جيدة جدا (Geological Strength Index).

D : معامل يتعلق بدرجة تخلخل الكتلة الصخرية نتيجة التفجير وارتخاء الإجهادات بعد الحفر، يتراوح بين الصفر للكتلة غير المخالطة والواحد للكتلة المخالطة.

s : معامل يمثل تماسك الصخر ويعطى بالعلاقة:

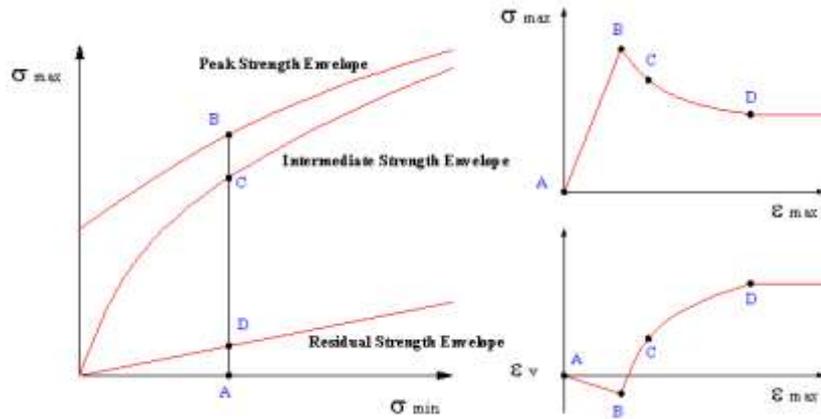
$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

a : معامل يمثل تطبيق وتشقق الصخر ويتعلق بزاوية الانتفاخ. ويعطى بالعلاقة التالية:

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-GSI/15} - e^{-20/3})$$

عندما $a = 1$ يطابق مغلف الانهيار مغلف Mohr-Coulomb.

يتم تحديد قيم m_i و σ_{ci} من خلال إجراء دراسة إحصائية لنتائج تجارب ثلاثي المحاور على العينات الصخرية المأخوذة من الوسط المدروس (برنامج EXCEL)، وفي حال عدم توفر هذه النتائج تؤخذ قيم المعاملات من جداول خاصة في مراجع ميكانيك الصخور [1] ، [3] ، [15] و [18].



الشكل (1) : رسم توضيحي لمغلفات المقاومة والعلاقة بين الإجهاد والتشوه في القانون المقترح

بالنظر إلى الشكل (1)، يمكننا وصف سلوك انخفاض مقاومة الصخر بعد الذروة وصولاً إلى المقاومة المتبقية على ثلاث مراحل:

• **المرحلة الأولى:** وتتعلق بفقدان التماسك تدريجياً نتيجة ازدياد وانتشار تشققات الشد في العينة الصخرية وبترافق ذلك مع ازدياد في الحجم حيث تكون زاوية الانتفاخ أكبر ما يمكن في بداية هذه المرحلة.

• **المرحلة الثانية:** وتمثل بعملية قص واحد أو اثنين من الشقوق المتشكلة في قلب العينة الصخرية نتيجة لزيادة كثافة تشققات الشد واقترابها من بعضها البعض. يترافق هذا القص مع نقصان تدريجي في زاوية الانتفاخ حتى تتعدم في نهاية هذه المرحلة عند الوصول للمقاومة المتبقية.

• **المرحلة الثالثة:** توافق سلوك الاحتكاك الانزلاقي بين سطوح الشقوق في العينة مشكلا المقاومة المتبقية للصخر، حيث يحدث الانزلاق دون أي تشوهات حجمية.

يتعلق مفهوم معيار الانهيار الوسطي بتدهور مقاومة العينة الصخرية بعد الذروة تبعا لفقدان التماسك تدريجيا وصولاً لتشكيل الشق وبدء القص على الشق والذي يمكن تحديده تطوره من علاقة [2] Ladanyi-Archambault:

$$\tau_{\max} = \sigma_n (1 - a_s) \tan(i + \phi_{res}) + a_s f(\sigma_n) \quad (2)$$

حيث:

σ_n : الإجهاد الناظمي على سطح الشق.

a_s : نسبة مساحة سطح القص إلى مساحة السطح الكلي للشق، ويمكن حسابه من المعادلة التالية:

$$a_s = \frac{\sum \Delta A_s}{A} = 1 - \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_{nT}}\right)^{k_1}$$

حيث:

σ_{nT} : الإجهاد الناظمي الانتقالي على سطح الشق الموافق لبداية المقاومة المتبقية.

i : زاوية انتفاخ الشق وتتغير بحسب الإجهاد الناظمي كما يتضح في العلاقة التالية:

$$i = a \tan \left\{ \tan(i_0) \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_{nT}}\right)^{k_2} \right\}$$

حيث:

i_0 : زاوية الانتفاخ الأعظمية الموافقة لإجهاد ناظمي معدوم على سطح الشق وهي تتبع طبيعة الصخر.

k_1, k_2 : ثوابت تتبع نوع الصخر.

بينما $f(\sigma_n)$ تعطى بالعلاقة:

$$f(\sigma_n) = c_{peak} + \sigma_n \tan \phi_{peak}$$

لدراسة العلاقة بين نقصان مقاومة القص ونشوه القص في الشق خلال هذه المرحلة تم الاعتماد على الدراسة

التي أجراها [3] Barton، حيث استخدم العلاقة التالية لتغير المقاومة:

$$\tau_{\max} = \sigma_n \tan \left\{ JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_\mu \right\} \quad (3)$$

حيث:

JRC : معامل خشونة سطح الشق (Joint Roughness Coefficient).

JCS : مقاومة الانضغاط للشق (Joint wall Compressive Strength).

تتغير زاوية الاحتكاك في العلاقة السابقة على الشكل التالي:

$$\phi_{mob} = JRC_{mob} \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_\mu$$

تمثل JRC_{mob} تطور حالة سطح القص في الشق، ويمكن أن نعبر عنها بالعلاقة التالية :

$$JRC_{mob} = A \cdot JRC_{peak}$$

حيث يمثل المعامل A تدهور حالة سطح القص بالنسبة لحالته عند المقاومة الأعظمية وتحدد قيمته بحسب انزياح القص النسبي من الجدول (1) التالي :

الجدول (1): قيمة المعامل A بحسب انزياح القص النسبي

| δ_s/δ_{s-peak} | A |
|---|---|
| $0.0 < \delta_s/\delta_{s-peak} < 0.3$ | 0 |
| $0.3 < \delta_s/\delta_{s-peak} < 0.6$ | $0.25 \delta_s/\delta_{s-peak} - 0.75$ |
| $0.6 < \delta_s/\delta_{s-peak} < 1.0$ | $0.625 \delta_s/\delta_{s-peak} + 0.375$ |
| $1.0 < \delta_s/\delta_{s-peak} < 2.0$ | $-0.15 \delta_s/\delta_{s-peak} + 1.15$ |
| $2.0 < \delta_s/\delta_{s-peak} < 4.0$ | $-0.075 \delta_s/\delta_{s-peak} + 1.00$ |
| $4.0 < \delta_s/\delta_{s-peak} < 10.0$ | $-0.033 \delta_s/\delta_{s-peak} + 0.83$ |
| $10.0 < \delta_s/\delta_{s-peak} < 100.0$ | $-0.0055 \delta_s/\delta_{s-peak} + 0.55$ |

لحساب تغير زاوية الانتفاخ بعد المقاومة الأعظمية تم اعتماد العلاقة المطورة عن علاقة Rowe والتي تأخذ الشكل التالي [10]:

$$\sin \psi = \gamma \left(\frac{\alpha' - \alpha_{res}}{\xi \cdot \alpha' + \alpha_{res}} \right) \quad (4)$$

حيث:

α_{res} : النسبة بين الإجهادات الرئيسية المتبقية.

γ و ξ : معاملات يتم تحديدها تجريبياً بحيث يتوافق المنحني الممثل للعلاقة المطورة مع قيم علاقة Barton لانخفاض زاوية الانتفاخ مع انخفاض مقاومة القص.

يمكن تمثيل هذا التناقص التدريجي للمقاومة من خلال تحديد تغير كل من معاملات معيار Hoek-Brown

بدءاً من الذروة حيث توافق $m_{peak}, s_{peak}, a_{peak}$ إلى القيم الموافقة للإجهادات المتبقية والتي يمكن تحديدها مباشرةً بمعرفة زاوية الاحتكاك المتبقية والتعويض في العلاقات العددية التالية [10]:

$$\begin{aligned} \sigma_{c-res} &= \sigma_c \\ m_{res} &= \frac{2 \sin \phi_{res}}{1 - \sin \phi_{res}} \\ s_{res} &= 0 \\ a_{res} &= 1 \end{aligned} \quad (5)$$

بينما يوافق معيار الانهيار الوسطي القيم التالية [4]:

$$\begin{aligned}\sigma_{c-e} &= \sigma_c \\ m_e &= \frac{1}{\frac{\sigma_t}{\sigma_c}} \left(m_{peak} \frac{\sigma_t}{\sigma_c} + s_{peak} \right)^{\frac{a_{peak}}{a_c}} \\ a_e &= \frac{a_{peak}}{1 + \frac{s_{peak}}{\frac{\sigma_t}{\sigma_c} m_{peak}}} \\ s_e &= 0\end{aligned}\quad (6)$$

حيث:

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_c} = \frac{m_{peak} + \sqrt{m_{peak}^2 + 4s_{peak}}}{2}$$

يمكن أن تمثل تغير هذه المعاملات مع انتقال الصخر من الإجهادات الموافقة لمعيار الانهيار الوسطي إلى الإجهادات المتبقية وربطها بالتشوهات الديفياتورية اللدنة المكافئة γ^p وذلك من خلال جدائها بالمعامل Barton $\downarrow A$ وحساب تشوهات القص الموافقة من الجدول (1).

يتم عندها حساب التشوهات الجانبية اللدنة بالاعتماد على علاقة زيادة الحجم المطورة بين التشوهات المحورية والتشوهات الحجمية من خلال العلاقة الجديدة التالية :

$$\varepsilon_3^p = \frac{\varepsilon_v^e - \frac{3}{2} \gamma^p (1 + \tan \beta) + \varepsilon_1^e \tan \beta}{3 + \tan \beta} \quad (7)$$

حيث:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1^e &= \frac{\sigma_{1-peak}}{E} \\ \varepsilon_v^e &= (1 - 2\nu) \varepsilon_1^e \\ \tan \beta &= \frac{2 \sin \psi}{1 - \sin \psi}\end{aligned}$$

$$\gamma^p = \frac{2}{3} (\varepsilon_1^p - \varepsilon_3^p) \quad \text{ثم حساب التشوهات المحورية اللدنة من خلال العلاقة :}$$

بالتالي يصبح هذا القانون المرن اللدن موافقاً لمعيار Hoek-Brown المعمم (GHB)، تتغير معاملاته تبعاً

لازدياد المتغير γ^p ، وتصبح معادلة سطح التحميل على الشكل التالي:

$$f(\bar{\sigma}, \gamma^p) = \sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_c \left(m(\gamma^p) \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s(\gamma^p) \right)^{a(\gamma^p)} = 0 \quad (8)$$

حيث :

σ_c : المقاومة بحالة الضغط أحادي المحور

γ^p : متغير انخفاض المقاومة. وهو عبارة عن ديفاتور التشوهات اللدنة وتعطى بالمعادلة التالية :

$$\text{avec } \dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\varepsilon}_{ij}^p - \frac{\dot{\varepsilon}_v^p}{3} \text{ et } \dot{\varepsilon}_v^p = \dot{\varepsilon}_{kk}^p \quad \gamma^p = \int \left(\frac{2}{3} \cdot \dot{\varepsilon}_{ij}^p \cdot \dot{\varepsilon}_{ij}^p \right)^{\frac{1}{2}} dt$$

وبالتالي فإن سطح التحميل سوف يتطور بتابعية γ^p . ومن أجل حالات خاصة لانخفاض المقاومة، فإن سطح التحميل يتوافق مع معيار انهيار ميكانيكي خاص (عتبة تشوه) وهو :

- **في الحالة البدائية.** ومن أجل $\gamma^p = 0$ ، فإن سطح التحميل يتوافق مع معيار الانهيار لبداية ظهور التشققات (endomagement). وانطلاقاً من عتبة التشوهات هذه، تبدأ التشوهات اللاعكوسة والمشاركة مع ظهور حالة زيادة الحجم للوسط الصخري.
- **في الحالة التالية،** ومن أجل $\gamma^p = \gamma_{pic}^p$ ، نجد أن سطح التحميل ينطبق مع معيار الانهيار للمقاومة الأعظمية للوسط الصخري.
- **من أجل $\gamma^p = \gamma_e^p$.** فإن سطح التحميل ينتقل ليصبح قريباً من معيار الانهيار المتوسط.
- **وبالنهاية،** ومن أجل تشوهات لدنة قاصة وعند $\gamma^p = \gamma_{ult}^p$ ، فإن سطح التحميل يتوافق مع معيار الانهيار للمقاومة المتبقية.

وانطلاقاً من ذلك، نلاحظ أن عتبات التشوه المذكورة سابقاً تحدد من خلال قيم للبرامترات m ، s ، a والتي تشارك في كتابة معادلة سطح التحميل. وكتابة سطح التحميل نحتاج إلى ثماني برامترات بالإضافة إلى مقاومة الضغط البسيط σ_c وهم :

- ثلاث برامترات لكتابة عتبة بداية ظهور التشققات في الوسط الصخري : (m_0, s_0, a_0) .
- برامترات لكتابة معيار الانهيار للمقاومة الأعظمية : (m_{pic}, a_{pic}) .
- برامترات لكتابة معيار الانهيار المتوسط : (m_{pic}, a_{pic}) .
- برامتر واحد لكتابة معيار الانهيار للمقاومة المتبقية : $(\phi_{res} \text{ أو } m_{res})$.

ومعظم هذه البرامترات تحدد من خلال نتائج تجربة الضغط ثلاثي المحاور (المقاومة الأعظمية والمقاومة المتبقية). ومن خلال نمذجتنا لهذه التجربة على برنامج Excel نستطيع الحصول على البرامترات اللازمة لتحديد معيار الانهيار الذي يحدد عتبة بداية التشقق وكذلك معيار الانهيار الانتقالي.

التحليل العددي وإنشاء خوارزمية لقانون السلوك:

التحليل العددي باستخدام برنامج EXCEL :

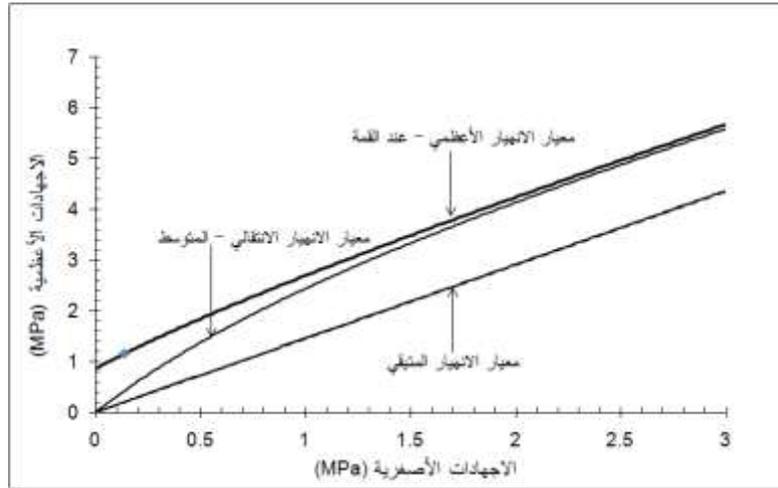
تتوفر لدينا نتائج للعديد من التجارب المخبرية المنفذة على عينات لأنواع مختلفة من الصخور، وأهم هذه النتائج هي لتجارب الضغط أحادي المحاور والضغط ثلاثي المحاور.

سيتم فيما يلي التحليل العددي لنتائج التجارب المخبرية على عينات المارل [6]، [7] للحصول على المعاملات الأساسية اللازمة لقانون السلوك المقترح. يعطي الجدول (2) قيم المعاملات الموافقة لمعايير المقاومة الثلاثة.

الجدول (2) : معاملات Hoek-Brown الموافقة لمعايير المقاومة الأعظمية والوسطية والحدية

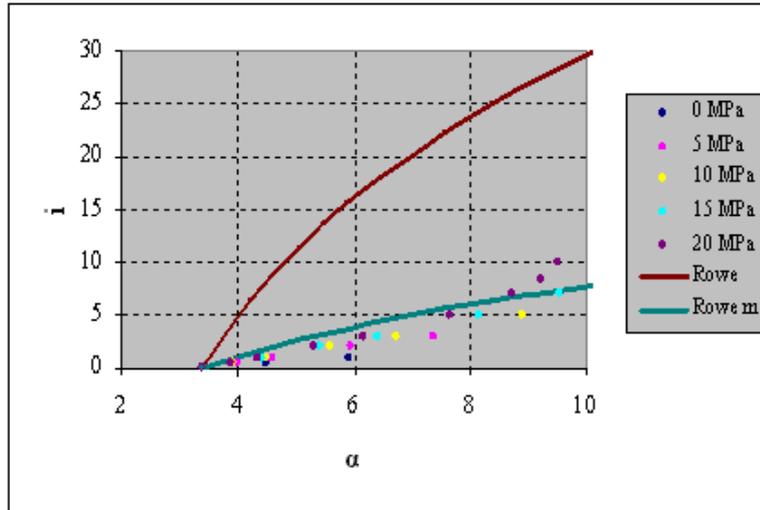
| المعامل | معيار المقاومة الأعظمية | معيار المقاومة الوسطية | معيار المقاومة الحدية |
|------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| σ_c [MPa] | 0.85 | 0.85 | 0.85 |
| m | 2.5 | 1.7 | 2.0 |
| s | 1 | 0 | 0.7 |
| a | 0.5 | 0.7 | 0.15 |

ويوضح الشكل (2) المغلفات الموافقة لمعايير المقاومة الثلاثة المدروسة وفقاً للنمذجة العددية بواسطة برنامج EXCEL. نلاحظ في الشكل (2) أنه من أجل ضغط جانبي معدوم ($\sigma_3 = 0$) ينطبق مغلف المقاومة الوسطية على مغلف المقاومة الحدية وهذا يعني أن العينة الصخرية في هذه الحالة تسلك سلوكاً هشاً حيث يحدث الانهيار بشكل سريع ومفاجئ بعد بلوغ المقاومة الأعظمية (Brittle Failure). بينما بازدياد الضغط الجانبي يقارب مغلف المقاومة الوسطية مغلف المقاومة الأعظمية لتنتقل العينة الصخرية إلى سلوك انخفاض المقاومة (Strain-Softening) وصولاً للدونة التامة مباشرة بعد الذروة من أجل اجهادات جانبية كبيرة (Ductile Behavior).



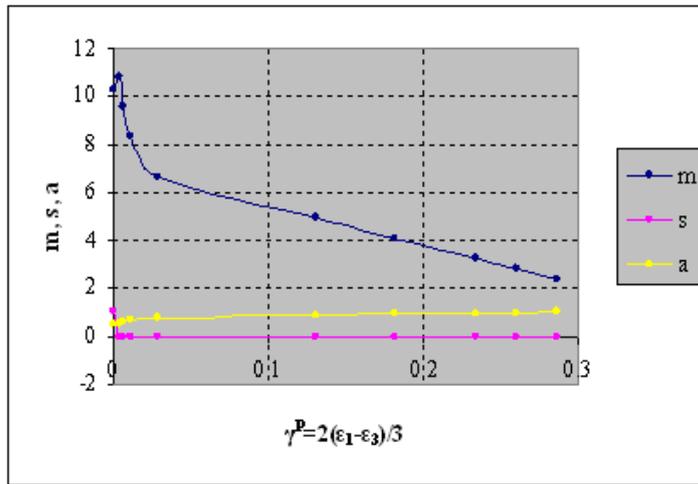
الشكل (2) : مغلفات Hoek-Brown الموافقة لمعايير المقاومة الأعظمية والوسطية والحدية

تأخذ معاملات علاقة Rowe المطورة للانتفاخ القيم $\gamma = 0.2$ و $\xi = 0.4$ ، بحيث ينطبق المنحني الممثل لهذه العلاقة مع القيم الموافقة لعلاقة Barton كما في الشكل (3).



الشكل (3) : علاقة Rowe المطورة بين زاوية الانتفاخ ونسبة الاجهادات الرئيسية

تتغير معاملات معيار Hoek-Brown مع التشوهات الديفياتورية اللدنة المكافئة (γ^p) بانتقال العينة الصخرية من اجهادات الذروة إلى الاجهادات المتبقية كما هي موضحة في الشكل (4). في الشكل (4) نلاحظ أن المعامل m يتغير بشكل ملحوظ مع ازدياد التشوهات الديفياتورية اللدنة المكافئة، وبالتالي له التأثير الأكبر في تغير مقاومة الصخر بعد الذروة.

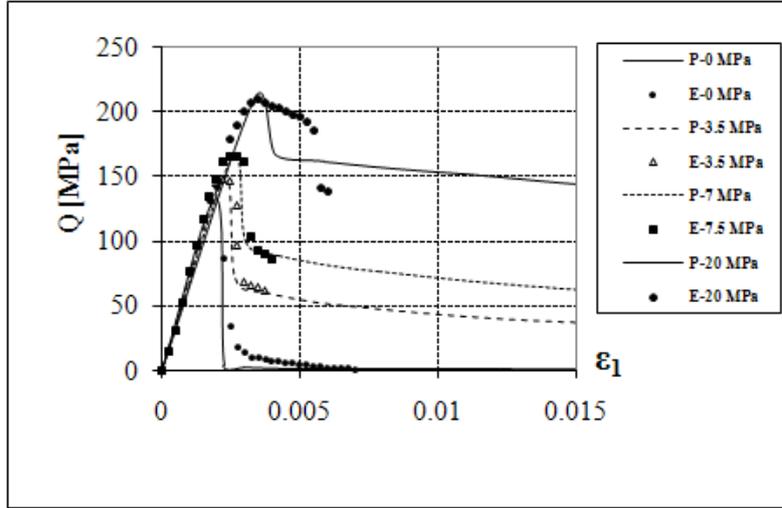


الشكل (4) : تغير معاملات Hoek-Brown مع التشوهات الديفياتورية اللدنة

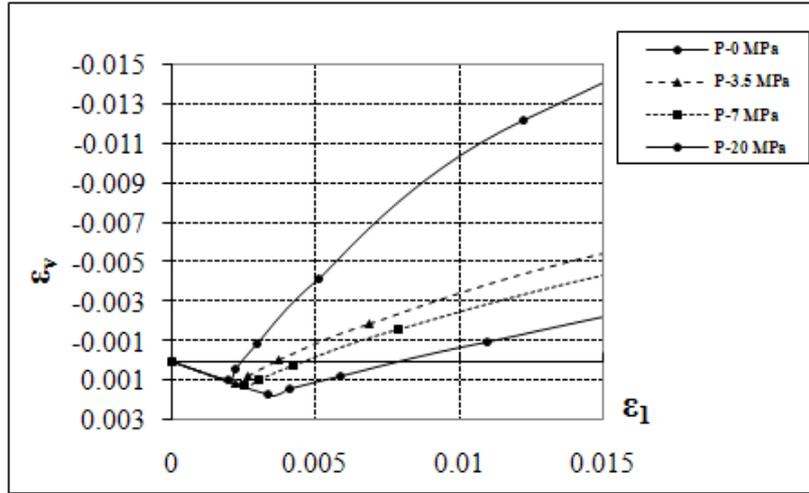
أما في الشكل (5) نلاحظ كيفية تقارب منحنى العلاقة بين الإجهاد والتشوه بحسب قانون السلوك المطور الذي تمت نمذجته في برنامج EXCEL مع نتائج تجارب ثلاثي المحاور على العينات الصخرية عند عدة ضغوط جانبية، كما ويبين الشكل (6) التغيرات الحجمية الموافقة لكل تجربة.

يمكن ملاحظة تغير السلوك مع تغير الضغط الجانبي المطبق. حيث يكون السلوك هشاً من أجل إجهاد جانبي معدوم، أي أن الانهيار في العينة بعد الذروة يحدث بشكل مفاجئ وسريع ويكون انتفاخ العينة الصخرية اكبر ما يمكن

(ضغط أحادي المحاور). بينما مع ازدياد الضغط الجانبي يتغير السلوك ليصبح لدناً تماماً بعد أن تنخفض المقاومة تدريجياً من المقاومة الأعظمية إلى المقاومة المتبقية (Strain-Softening)، ويقل انتفاخ العينة الصخرية.

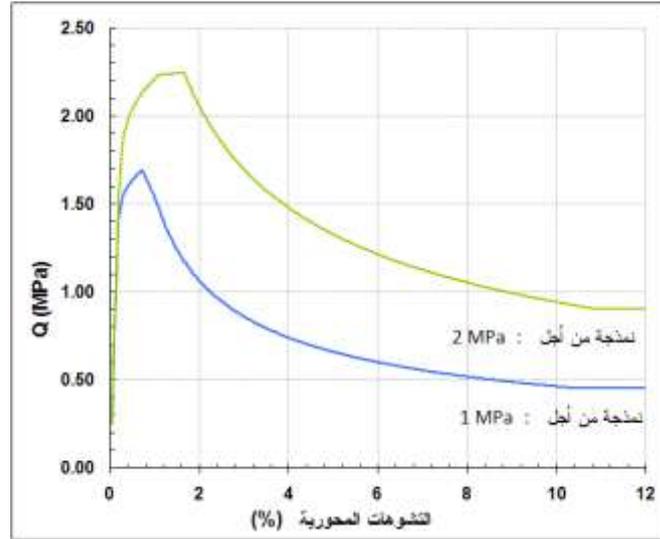


الشكل (5) : علاقة الإجهاد بالتشوه عند عدة ضغوط جانبية مقارنة بين قانون السلوك والنتائج المخبرية



الشكل (6) : علاقة التشوهات المحورية بالتشوهات الحجمية عند عدة ضغوط جانبية

إذاً تمكنا النمذجة العددية لتجارب ثلاثي المحاور بواسطة EXCEL وبدقة كافية للحصول على البرامترات اللازمة لقانون السلوك كما هو مبين بالشكل (7) لعينة من المارل.



الشكل (7) : نمذجة تجريبية لضغط ثلاثي المحاور لعينة من المارل

2.2.2 إنشاء خوارزمية لقانون السلوك:

يتم في الخوارزمية حساب الإجهادات الرئيسية (Principal Stresses) الناتجة عن تطبيق الزيادة في التشوهات الرئيسية بالطريقة المرنة من خلال استخدام مصفوفة القساوة [K] والتي تأخذ الشكل التالي:

$$[K] = \begin{bmatrix} \lambda + 2G & \lambda & \lambda \\ \lambda & \lambda + 2G & \lambda \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2G \end{bmatrix}$$

عندما يتجاوز التشوه الرئيسي المحوري القيمة الأعظمية الموافقة للمرونة، يتم تعديل قيم الاجهادات الرئيسية المحسوبة باستخدام مصفوفة القساوة سابقاً وحساب قيم التشوهات الرئيسية المرنة واللينة بحسب القانون الجديد.

تم كتابة برنامج لهذه الخوارزمية في لغة FORTRAN باستخدام برنامج Compaq Visual Fortran V6.6 ، والتأكد من نتائجه من خلال المقارنة مع نتائج برنامج EXCEL؛ لكن لا مجال لإيراده في هذه المقالة.

النتائج والمناقشة:

النمذجة العددية:

تعتبر معظم الأنفاق العميقة منشآت ثلاثية الأبعاد معقدة الشكل وغير منتظمة، كما أن وجود الفواصل والشقوق في الصخر تجعل من الكتلة الصخرية المدروسة وسطاً غير مستمر وغير متجانس. لذلك تعتبر الحلول التقليدية في ميكانيك الصخور ذات قدرة محدودة في تحليل الاجهادات والانزلاقات وتحديد الكتل المنهارة حول النفق في مثل هذه المشاريع. لكن بعد اختراع الحاسوب الرقمي وانتشاره خلال العقود القليلة الماضية تم تطوير طرائق رقمية لوضع حلول تقريبية للعديد من المشاكل الهندسية بما فيها مسائل الأنفاق العميقة، ومن أهم هذه الطرق هي طريقة التحليل باستخدام العناصر المحدودة.

هناك نوعان من التحليل باستخدام طريقة العناصر المحدودة، التحليل ثنائي الأبعاد وهو بسيط يستخدم في تحليل الإجهادات والانزلاقات في الوسط الصخري حول النفق عندما يكون طول النفق كبيراً بالمقارنة مع أبعاد مقطعه،

حيث لا تتأثر الإجهادات والانزياحات في المستوي العمودي على محور النفق بأطراف النفق (Plain Strain Analysis). بينما يستخدم التحليل ثلاثي الأبعاد في تحليل الاجهادات والتشوهات في الوسط الصخري المحيط بالأنفاق الواسعة والمعقدة ووضع برنامج زمني للحفر والتدعيم اللازم.

تم تطوير العديد من البرامج التي تعتمد طريقة العناصر المحدودة في التحليل الهندسي وأهمها هو برنامج ABAQUS، حيث يعد برنامجاً متقدماً جداً في تحليل المشاكل الهندسية ثنائية وثلاثية الأبعاد. لاستخدام هذا البرنامج في النمذجة الرقمية نحتاج لـ:

1. وضع النموذج الرياضي للمسألة المدروسة ورسم شبكة العناصر المحدودة.

2. تحديد مواصفات المواد وقوانين السلوك التي تحكم سلوك هذه المواد.

3. وضع الشروط الحدية الموافقة لحالة الوسط المدروس في الواقع.

تم استخدام هذا البرنامج في النمذجة الرقمية للنفق المدروس للحصول على النتائج ومقارنتها بقياسات الواقع.

النمذجة باستخدام برنامج ABAQUS:

تم استخدام معيار Mohr-Coulomb للانهياب في نمذجة الأنفاق التجريبية عند المقطع [6] PM38.5، والمحفورة في تربة فليشبية غضارية ذات تسليح كلسي على عمق 160 m. تمتلك التربة عند هذا العمق المواصفات الميكانيكية التالية :

• مواصفات المرونة : معامل "يونغ": $E=800 \text{ MPa}$ ، معامل "بواسون": $\nu=0.25$

• مواصفات اللدونة : زاوية الاحتكاك: $\phi=25^\circ$ ، التماسك: $c=0.4 \text{ MPa}$ ، زاوية الانتفاخ: $\psi=10^\circ$

يأخذ معامل ضغط التربة الجانبي عند الراحة القيمة $K_0=1.1$ ، حيث إن الإجهادات الشاقولية البدئية في الوسط

$\sigma_{v0}=3.68 \text{ MPa}$ ، بينما تأخذ الإجهادات الأفقية البدئية القيمة $\sigma_{h0}=4.05 \text{ MPa}$.

تمت نمذجة عملية حفر الأنفاق التجريبية عند هذا المقطع وفق الخطوات التالية :

1. وضع النموذج والشروط الحدية وتطبيق الإجهادات البدئية ($K_0=1.1$).

2. حفر النفق الغربي بقطر $D=4.8\text{m}$ مع قيمة لمعامل الحفر $\lambda=0.7$.

3. تنفيذ بطانة بيتونية بسماكة 0.4m والمرور إلى التوازن على المدى القصير $\lambda=1$ (التشوه في المستوي

Plain Strain). تمتلك البطانة البيتونية المواصفات الميكانيكية التالية:

✓ معامل "يونغ": $E=15000 \text{ MPa}$

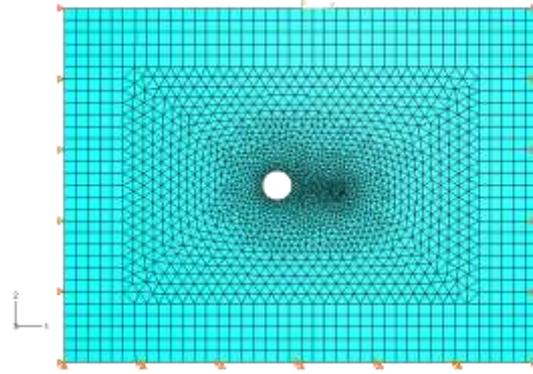
✓ معامل "بواسون": $\nu=0.2$

4. حفر النفق الشرقي بقطر $D=3\text{m}$ يبعد مركزه عن مركز النفق الغربي مسافة $L=10\text{m}$ ، والمرور إلى

التوازن على المدى القصير $\lambda=1$.

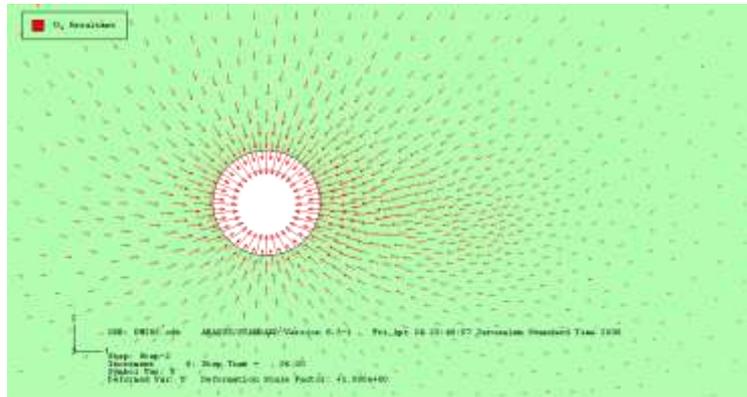
يظهر في الشكل (9) نموذج العناصر المحدودة والشروط الحدية التي هي عبارة عن مساند متحركة على جانبي

النموذج ومساند ثابتة في أسفله.



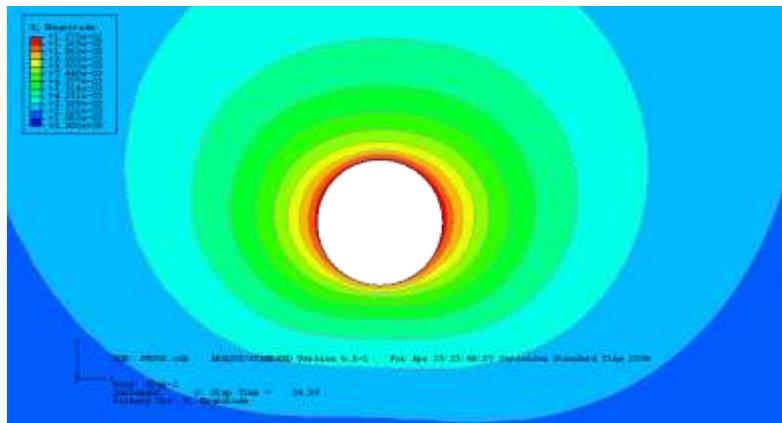
الشكل (9) : نموذج العناصر المحدودة والشروط الحدية

مع تقدم جبهة الحفر في النفق الغربي وبلوغ معامل الحفر القيمة $\lambda=0.7$ تكون أسهم الانتقالات في الكتلة حول النفق الغربي عند المقطع المدروس كما في الشكل (10).



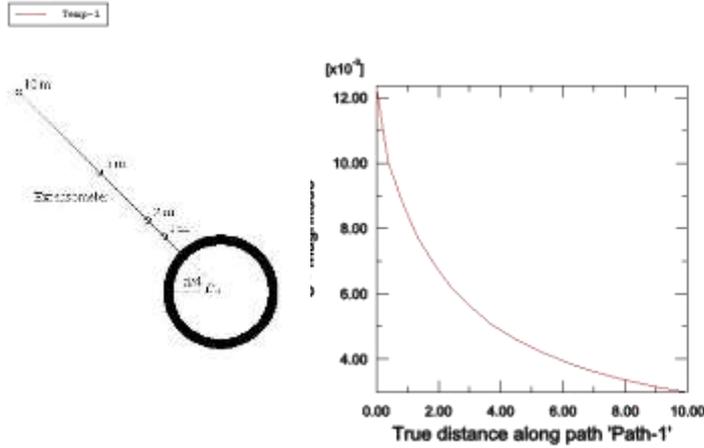
الشكل (10) : أسهم الانتقالات من أجل $\lambda=0.7$

يمكن من الشكل (11) ملاحظة تشوه النفق الغربي على شكل قطع ناقص شاقولي وذلك بسبب النسبة بين الاجهادات البدئية في الوسط.



الشكل (11) : الانتقالات من أجل $\lambda=0.7$

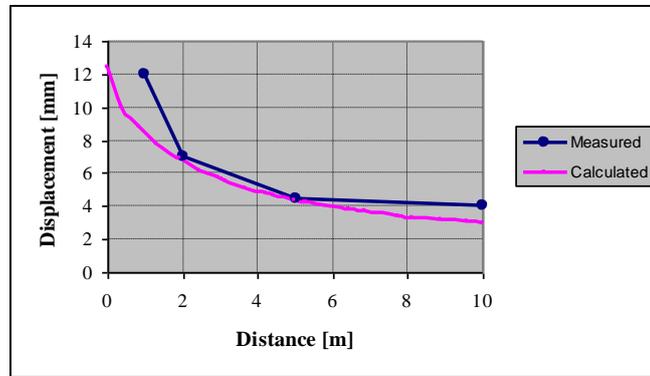
تأخذ الانتقالات القيم الموضحة في الشكل (12)، وهي أعظمية في جدران النفق وتساوي حوالي 12 mm.



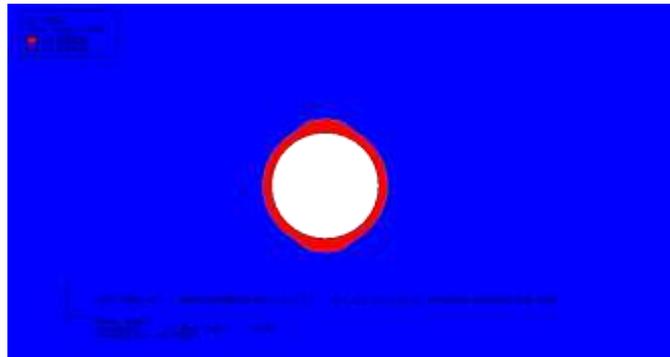
الشكل (12) : الانتقالات عند النقاط الموافقة لموضع جهاز قياس التمدد

تبلغ قيمة الانتقالات الناتجة في النمذجة عند النقاط التي توافق موضع جهاز قياس التمدد (Extensometer) القيم الموضحة في الشكل (12)، ومن خلال مقارنتها مع القيم المقاسة نجد أنها متقاربة بشكل كبير كما يظهر في الشكل (13).

يوضح الشكل (14) المنطقة المتلدنة من الكتلة الصخرية حول النفق عند هذه المرحلة، ويمكن ملاحظة اتساعها في أعلى وأسفل النفق بسبب النسبة بين الاجهادات البدئية.

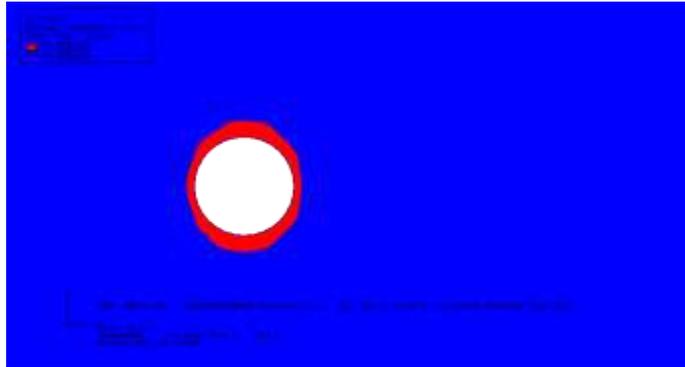


الشكل (13) : مقارنة بين الحساب والقياس للانتقالات على امتداد جهاز قياس التمدد



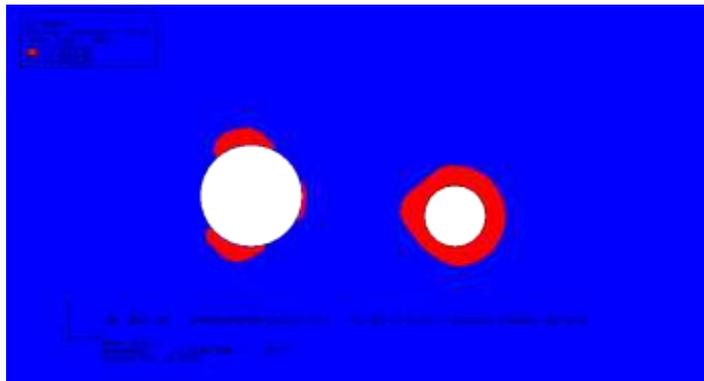
الشكل (14) : المنطقة المتلدنة من الكتلة الصخرية حول النفق من أجل $\lambda=0.7$

بعد تنفيذ البطانة البيتونية والمرور إلى حالة التوازن على المدى القصير تتطور القوى المحورية الحلقية في البطانة وتكون أعظمية في أعلى وأسفل البطانة بسبب نسبة الإجهادات البدئية. تأخذ القوة المحورية الحلقية القيمة 2.68 MN في أسفل البطانة، بينما تساوي 2.62 MN في أعلاها. تزداد مساحة المنطقة المتلدنة من الكتلة الصخرية حول النفق بشكل طفيف بسبب تنفيذ التدعيم، ويلاحظ اتساعها في أعلى وأسفل النفق كذلك، كما يظهر الشكل (15).



الشكل (15) : المنطقة المتلدنة من الكتلة الصخرية حول النفق من أجل $\lambda=1$

تزداد القوى المحورية الحلقية في يمين ويسار البطانة بشكل ملحوظ بعد حفر النفق الشرقي والمرور إلى التوازن على المدى القصير، لتكون أعظمية وتساوي 3.03 MN في يمين البطانة من جهة النفق الشرقي. يوضح الشكل (16)، المنطقة المتلدنة في الكتلة الصخرية حول النفقين ويلاحظ كبر مساحة المنطقة المتلدنة حول النفق الشرقي بسبب عدم تدعيمه، واتساعها باتجاه النفق الغربي بسبب تركيز الإجهادات الشاقولية بين النفقين ويلاحظ تغير شكل تشوه النفق الغربي ليصبح بيضوياً باتجاه النفق الشرقي.



الشكل (16) : المنطقة المتلدنة من الكتلة الصخرية حول النفقين من أجل $\lambda=1$

يوضح الجدول (3) التالي القيم المحسوبة والمقاسة للقوى المحورية الحلقية في البطانة البيتونية قبل وبعد مرور النفق الشرقي:

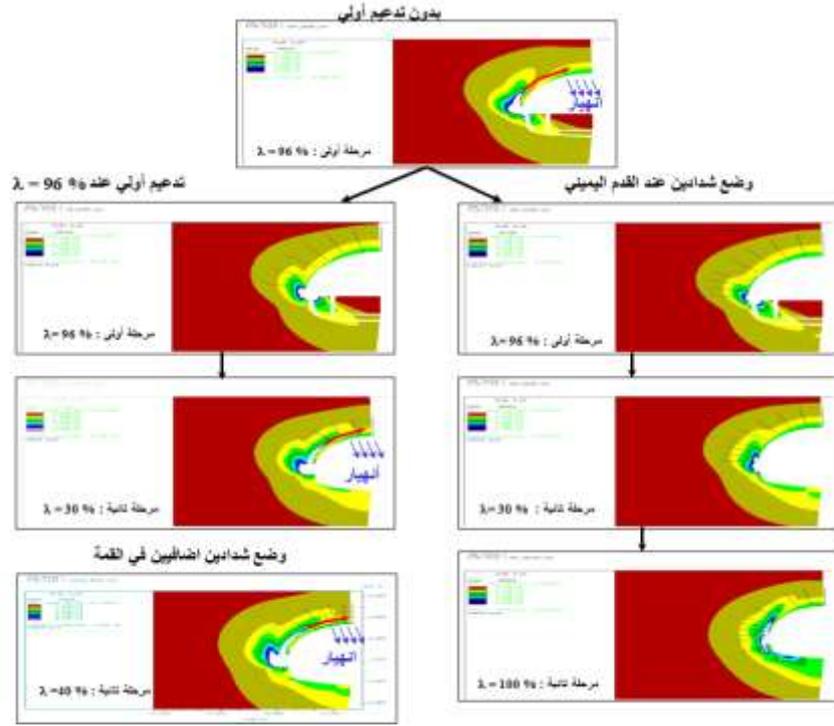
الجدول (3) : مقارنة بين القياس والحساب للقوى المحورية الحلقية في البطانة قبل وبعد مرور النفق الشرقي

| أسفل البطانة [MN] | يسار البطانة [MN] | أعلى البطانة [MN] | يمين البطانة [MN] | القوى المحورية الحلقية | |
|-------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|
| | | | | القيم المقاسة | القيم المحسوبة |
| 3.25 | 2.8 | 0.95 | 2.8 | القيم المقاسة | قبل مرور النفق الشرقي |
| 2.68 | 2.55 | 2.62 | 2.55 | القيم المحسوبة | |
| -18% | -9% | +276% | -9% | الفرق النسبي | |
| 3.45 | 3.5 | 1.36 | 3.7 | القيم المقاسة | بعد مرور النفق الشرقي |
| 2.40 | 2.80 | 2.42 | 3.03 | القيم المحسوبة | |
| -30% | -20% | +78% | -18% | الفرق النسبي | |

نلاحظ في الجدول (3) أن القيم المحسوبة في النمذجة العددية للقوى المحورية الحلقية في البطانة يميناً ويساراً تقل قبل مرور النفق الشرقي عن القيم المقاسة بنسبة 9%. يعود ذلك الفرق إلى معيار Mohr-Coulomb للانهييار المستخدم في النمذجة والذي يفترض سلوكاً لئلاً تماماً بعد تجاوز مقاومة القص الأعظمية في الصخر، في حين أن الصخر وبالاقترب من جدار النفق، حيث تتناقص قيمة الإجهاد القطري (الجانبية) وتزداد قيمة الإجهاد المماسي، يتغير سلوكه من اللدن تماماً (Ductile) إلى السلوك الهش (Brittle). هنا تبرز الحاجة إلى القانون المقترح لاستخدامه في النمذجة العددية من أجل تمثيل هذا التغير في السلوك مع تغير الإجهادات الجانبية ولحساب التشوهات الحجمية الموافقة، وبالتالي الحصول على قيم قريبة من الواقع للقوى في البطانة البيتونية وتصميمها بشكل آمن. وعند استخدام قانون السلوك المطور وإدخاله في البرنامج لنمذجة النفق نلاحظ أن مناطق التشوهات تظهر بوضوح وإدخاله في الشكلين (17، 18) ويمكننا ذلك من اختيار مادة التدعيم سواء من حيث زمن تنفيذها أو نوعها للحد من الانهييار.



الشكل (17) : مناطق التشوهات المتوافقة مع الواقع باستخدام قانون السلوك المتطور



الشكل (18) : تطور مناطق التشوه بدون ومع استخدام التدعيم المتوافقة مع الواقع باستخدام قانون السلوك المتطور

الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا البحث عرض قانون سلوك متطور (من حيث البرامترات وطريقة الحصول عليها) قادر على تمثيل سلوك الوسط الصخري في منطقتي التشوهات المتوسطة والكبيرة حول الأنفاق العميقة. تبين من خلال تحليل نتائج النمذجة العددية للأنفاق العميقة باستخدام القوانين التقليدية كمعيار Mohr-Coulomb للانهييار، أن هناك فرقاً واضحاً بين النمذجة والقياس مما يستلزم استخدام قانون مماثل للقانون المطور في النمذجة ليكون تصميم التدعيم اللازم آمناً ويمنع تطور تشقق الوسط الصخري المحيط بالنفق ويحد من آلية الانهييار. يوصى مستقبلاً:

- العمل على دمج هذا القانون ضمن برامج العناصر المحدودة المتطورة والتي تسمح بذلك مثل برنامج ABAQUS، FLAC-2D، للاستفادة من القانون في نمذجة المنشآت المظورة على اختلاف أنواعها بشكل أقرب للواقع وتصميمها ضمن عامل الأمان المطلوب.
- العمل على تطوير هذا القانون من خلال محاولة ربط تغير المعاملات m , s , a مع التشوهات الديفياتورية اللدنة المكافئة γ^p بعلاقات رياضية.
- العمل على تطوير هذا القانون بحيث يمثل سلوك اللزوجة في الوسط ليتم استخدامه في تحليل الأنفاق العميقة المحفورة في الصخور الانضغاطية (Squeezing Rocks).

المراجع:

- [1] Evert Hoek & Carlos Carranza-Torres & Brent Corku. *Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition*. 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunneling Association of Canada Conference : NARMS-TAC, 2002, 267-271.
- [2] LADANYI, B.; ARCHAMBAULT, G. .*Simulation of the shear behavior of a jointed rock mass*. Proc. 11th Symp. On Rock Mechanics, 1970. ,. 105-125, Berkeley.
- [3] BARTON, N. *The Shear Strength of Rock and Rock Joints*. Int. J. Rock. Mech. Min. & Geomech. Abstr. Vol 13. 1976, 225-279.
- [4] WAWERSIK, W. R.; FAIRHURST, C. *A Study of Brittle Rock Fracture in Laboratory Compression Experiments*. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Vol7, 1970, 561-575
- [5] HOEK, E.; BROWN, E.T. Empirical Strength Criterion for Rock Masses J. Geotech. Engng. Div. Am. Soc. Civ. Engrs. 106. GT9. 1980. ; 1013-1035..
- [6] HABIMANA, J.; LABIOUSSE, V.; DESCOEUDRES, F. *Failure Criterion for Cataclastic Rocks: Experience from the Cleuson-Dixence Project* Congrès International de Mécanique des Roches. Paris 1999. ;560.
- [7] Comité Français de Mécanique des Roches. *Manuel de mécanique des roches*. Tome 1. Les presses de l'Ecole des Mines de Paris. 2000. ;427.
- [8] WOOD, D. M. *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics*. Cambridge University Press. 1990, 388.
- [9] LORET, B. *Elastoplasticité à simple potentiel*. Manuel de rhéologie des géomatériaux. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 1987.; 522.
- [10] ROWE, P.W.. *The stress-dilatancy relationship for static equilibrium of a assembly of particles in contact*. Proceedings of Royal Society. Volume 269. 1962.; 500-527..
- [11] VERMEER, P.A.; DE BORST, R. *Non-associated plasticity for Soils, Concrete and Rock*. HERON –1984. n°3. Vol.29.
- [12] MICHELIS, P.N. *Work-Softening and Hardening behaviour of Granular Rocks*. Rock Mechanics 14. 1981, 187-200.
- [13] WAWERSIK W.R.; FAIRHURST, C. *A Study of Brittle Rock Fracture in Laboratory Compression Experiments*. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Vol7, 1970, 561-575
- [14] MARTIN, C.D.; READ, R.S.; MARTINO, J.B. *Observations of Brittle Failure Around a Circular Test Tunnel*. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Vol34, N°7, 1997; 1065-1073.
- [15] E. HOEK. *Strength of Jointed Rock Masses*. Géotechnique –33– N°3–1983– 187;223
- [16] MASURE, P. *Comportement des roches à anisotropie planaire discontinue*. Application à l'étude de la stabilité des excavations souterraines. Mars 1970; 322.
- [17] FLAC 2D Version 3.30. *Notice de principe, d'utilisation et de validation*. Itasca. Consultants S.A.; 257.
- [18] HOEK, E.; BROWN, E.T. *Practical Estimates of Rock Mass Strength*. Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr. Vol 34, N° 8, 198. , 1165-1186, 1425.