

## دراسة عددية لآلية انتشار الشقوق في جدران الأنابيب الفولاذية لنقل الغاز تحت تأثير الحملات الدورية

\*د وسام الحزواني

(الإيداع 23 تشرين الثاني 2017، القبول 23 آيار 2018)

الملخص:

- يتم تصنيع الأنابيب المستخدمة في مجال النفط والغاز وفق مواصفات عالمية منها الكود العالمي American Petroleum Institute API-5L. سيتم التركيز في هذا البحث على الفولاذ Grade X65 وذلك بسبب متانته الجيدة وسعره المنخفض وقابليته الممتازة للحام مما يجعله يتفوق على أصناف أخرى من الفولاذ، إضافة إلى استخدامه بكثرة في منشآت القطر. ويعتبر وجود الشقوق على السطوح الداخلية أو الخارجية للأنابيب من أهم العيوب التي تساهم في تخفيض عمر وصلاحية هذه الأنابيب، كما يمكن أن تؤدي هذه الشقوق إلى حوادث كارثية.
- تم في هذا البحث التحقق تجريبياً من مواصفات معدن الأنابيب المركبة ومطابقتها مع المواصفة القياسية لهذا الفولاذ من خلال التركيب الكيميائي والبنية المجهرية واختبار الشد واختبار الصدم واختبار القساوة.
- بعد ذلك تمت دراسة توزيع الإجهادات في جدران أنابيب ذات أقطار وسماكات مختلفة وخاضعة لقيم مختلفة للضغط الداخلي، وقد تمت الدراسة تحليلياً باستخدام المعادلات وعددياً بطريقة العناصر المنتهية باستخدام البرنامج Ansys.
- كما تمت دراسة احتمالية حدوث الإنهيار في حالة وجود الشقوق بسبب التأثير المشترك لكلٍ من الشقوق والضغط المطبق، ومن ثم تم حساب معدل نمو الشقوق تحت تأثير الضغط الداخلي المتكرر وبالتالي معرفة العمر الآمن للأنبوب من خلال حساب قيم عامل شدة الإجهاد  $K_I$  والذي يؤدي إلى فتح قمة الشق. ومن ثم مقارنة هذه القيم مع قيمة عامل متانة الانكسار (عامل شدة الإجهاد الحدي) من أجل التحقق من ضمان عمل وسلامة الأنابيب (في حال وجود الشقوق فعلاً ضمن جدار الأنابيب) وعدم حدوث ظاهرة الانكسار المفاجئ للأنابيب الذي قد يؤدي إلى حدوث كارثة بشرية أو بيئية.

الكلمات المفتاحية: دراسة عددية - الشقوق - الأنابيب - الحملات الدورية

\*أستاذ مساعد في كلية الهندسة المدنية، جامعة حماة.

## Numerical study of crack propagation mechanism in steel gas pipe walls under periodical loads

\*Wissam Al-Hozwany

(Received 23 November 2017, Accepted 23 May 2018)

### Abstract:

Tubes used in oil and gas fields are manufactured according the international standard specifications which the international code *American Petroleum Institute* API-5L is one of these standards. In this paper, it will be focused on the steel Grade X65. This steel has good strength, low price and excellent ability to welding. These properties make this kind of steel precedes the other kinds of steel, in addition to its common usage in industrial institutions in Syria. Existing of cracks on the internal and external surfaces of the tubes is one of the most important defects which contributes in reducing the life and validity of these tubes. Also, these cracks may cause catastrophic problems.

In this paper, an experimental verification about the material properties of the considered tubes has been done, and then these properties have been matched with the standard specifications of this steel. These two procedures have been achieved through chemical composition test, microstructure test, tension test, impact test and toughness test.

After that, the stress distribution in pipes walls has been studied. These tubes have different diameters and different wall thicknesses and subjected to different values of inner pressure. This study has been done analytically and numerically by finite element method using the multipurpose software package ANSYS 13.

In addition, the probability of failure happening – in the case of crack existing by the reason of the common influence of cracks and applied pressure – has been studied. Then the ratio of crack propagation has been calculated under cyclic internal pressure and the safe life of tube may be determined by calculating the stress intensity factor  $K_I$ , which causes the crack tip to be opened. After that, values of  $K_I$  will be compared with the toughness fracture factor  $K_{IC}$  (critical stress intensity factor). This comparison will be done for the verification of warranty and safety of the tubes and avoiding the sudden fracture of the tubes which may cause environmental or human disasters.

**Key words:** numerical study – cracks – tubes – cyclic loading.

---

\*Faculty of Civil Engineering, University of Hama

**1- مقدمة: Introduction**

يركز المهندسون على سلامة وأمان أنابيب نقل الغاز بسبب النتائج الكارثية التي تحصل عند تحطم هذه الأنابيب، وفكرة هذا البحث هي العمل على ضمان متانة وكفاءة هذه الأنابيب من خلال دراسة آلية انتشار الشقوق cracks في جدران الأنابيب بسبب الحمولات الدورية التي تخضع لها هذه الأنابيب أثناء وجودها بالخدمة الأمر الذي سيؤدي بها حتماً إلى حدوث الانكسار fracture.

يعرف الشق crack بأنه فصل المادة بالفتح أو بالإزاحة حيث مسافة الفصل أصغر بكثير من طول الشق، حيث يمكن أن تنمو هذه الشقوق نتيجة ظروف التشغيل من ضغوط ودرجات حرارة متغيرة، ويجب الإشارة إلى الفارق بين دورية التحميل ووتيرة التحميل أي زيادة الحمولة حتى مستوى معين، فإذا حصل نمو الشق ومن ثم الانهيار بسبب الحمولة الدورية فإن هذا يشير إلى حدوث التعب، أما إذا حصل نمو الشق ومن ثم الانهيار بسبب الوتيرة العالية للتحميل فإن هذا يشير إلى حدوث الانكسار [1]. يعرف الانكسار fracture بأنه العملية التي تعبر عن الانفصال الكلي والنهائي الذي يحدث في المادة حيث يسبق هذا الانفصال نمو غير مستقر وغير منتظم للشق.

**• أهمية البحث**

بسبب أن مشكلة حدوث وانتشار الشقوق في جدران أنابيب نقل النفط هي إحدى المشاكل الرئيسية التي تواجه المنشآت النفطية، ومن خلال العمل في تركيب التجهيزات الموجودة في منشأة حيان (قرب تدمر) لفصل النفط عن الغاز، كان لابد من التحقق من مواصفات المعدن المستخدم في الأنابيب المركبة ومطابقته للمواصفات المطلوبة، وكان لابد من تحديد قيم عامل شدة الإجهاد المتولدة ( لو تولد شق ضمن جدار الأنبوب) عند طول معين للشق تحت ضغوط عمل مختلفة ومن ثم مقارنة هذه قيم عامل شدة الإجهاد مع قيمة عامل متانة الانكسار (عامل شدة الإجهاد الحدي) من أجل التحقق من ضمان عمل وسلامة الأنابيب وعدم حدوث ظاهرة الإنكسار المفاجئ للأنابيب الذي قد يؤدي إلى حدوث كارثة بشرية أو بيئية.

**• الدراسة المرجعية**

أظهر العالم Broek اعتماداً على نظريات المرونة الخطية أن عامل شدة الإجهاد  $K$  يجب أن يتناسب بشكل خطي مع الإجهاد  $\sigma$  ومع الجذر التربيعي لطول الشق  $\sqrt{a}$  وفق المعادلة التالية  $K = \sigma\sqrt{\pi a}$ . يحدث الانكسار عند اجتماع القيم الحدية والدرجة لكل من الإجهاد والانفعال أي عندما يتساوى عامل شدة الإجهادات  $K$  stress intensity factor مع القيمة الحدية لعامل شدة الإجهادات  $K = K_c$  وبالتالي يعتبر المقدار  $K_c$  قيمة تعبر عن متانة الانكسار للمادة [2] [3]. استخدمت نظرية Capelle لتحديد قيمة إجهاد الانكسار  $\sigma_f$  الذي سوف يسبب تغلغل وانتشار الشق حيث توصل إلى تطابق جيد بين الدراسة التحليلية و النتائج التجريبية لمتانة الانكسار لمادة الزجاج، لكن الدراسة كان لها تقديرات سيئة لمتانة الانكسار للمعادن بسبب أن المعادن تعاني من الدخول في مرحلة الخضوع عند قمة الشق قبل حدوث الانكسار [9].

**• هدف البحث**

يهدف هذا البحث إلى التحقق من مواصفات الفولاذ المدروس والمصنف حسب الكود العالمي API-5L [4]، ومن ثم إيجاد توزع الإجهادات في جدران الأنابيب تحت تأثير ضغط التشغيل تحليلياً وعددياً والتأكد من التشغيل الآمن. بعد ذلك سيتم تحليلياً وعددياً حساب قيم عامل شدة الإجهاد  $K$  المتولدة عند أطوال مختلفة للشق ( داخلي أو خارجي) تحت ضغط داخلي محدد ومن ثم مقارنة هذه القيم مع القيمة الحدية لعامل متانة الانكسار  $K_c$  للفولاذ المستخدم لمعرفة عدد مرات تطبيق الحمولة، وكذلك لتحديد إن كان سوف يحصل انكسار مفاجئ وتحطم كارثي لأنبوب نقل الغاز عند وصول الشق إلى طول معين، أو ذلك لن يحدث بل سوف تسرب للغاز الموجود داخل الأنبوب حتى إن وصل الشق إلى السطح الآخر للأنبوب.

## 2- توصيف المواد Material characterization

تم القيام ببعض الاختبارات لمعرفة الخصائص الميكانيكية للمادة المستخدمة في تصنيع الأنابيب والتأكد من مطابقتها للشروط والمواصفات المطلوبة.

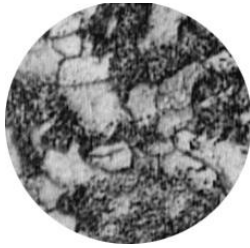
## • التركيب الكيميائي والبنية المجهرية

يوضح الجدول [1] التركيب الكيميائي للفولاذ Grade X65 حسب التحليل المخبري الذي تم الحصول عليه من مختبرات كلية الهندسة الميكانيكية في جامعة حلب.

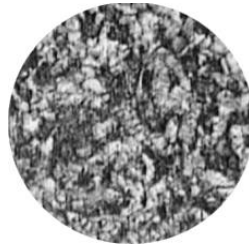
الجدول رقم (1): التركيب الكيميائي للفولاذ Grade X65

| Elements         | Fe   | C    | Si   | Mn   | Cr   | Mo   | P     | S     | Ni  | (Nb +Vo +Ti) | Ce   |
|------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-----|--------------|------|
| Max.percentage % | 95.6 | 0.18 | 0.45 | 1.65 | 0.50 | 0.50 | 0.025 | 0.015 | 0.5 | 0.15         | 0.43 |

تظهر المقارنة بين نتائج التحليل التي تم الحصول عليها وبين التركيب الكيميائي الواجب توفره أن نسبة الكربون في الفولاذ المختبر هي أقل من القيمة الأعظمية المسموح بها حسب المواصفة وذلك على عكس المنغنيز الذي يوجد بنسبة



1700×



850×

أكبر من القيمة الأعظمية المسموح بها حسب المواصفة، حيث يوضح الشكل 1 البنية المجهرية للفولاذ Grade X65، حيث يظهر أن جزيئات البرليت (المساحات السوداء) تتوضع حول حبيبات الفيريت (المساحات البيضاء). جدير بالذكر أنه يظهر تأثير وجود النسبة العالية من المنغنيز من خلال عدم وجود الحدود الدقيقة بين البرليت و الفيريت.

الشكل رقم (1): البنية المجهرية للفولاذ Grade X65

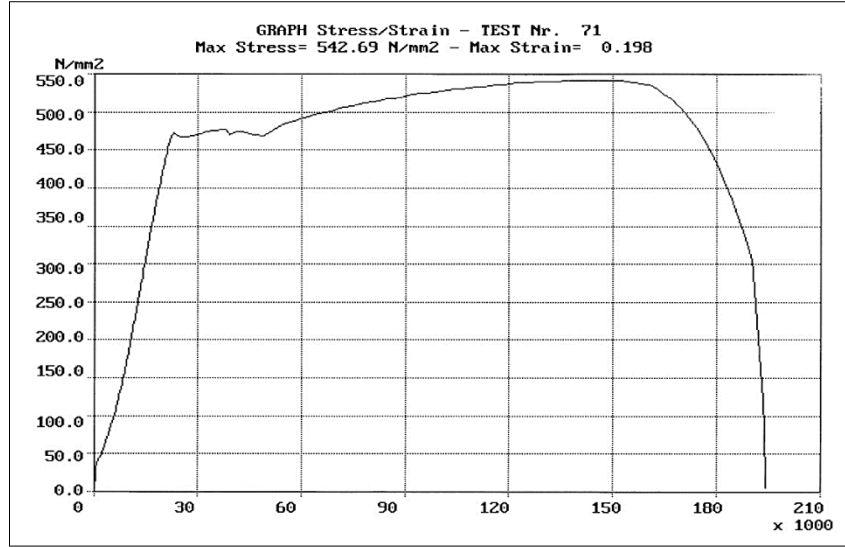
## • اختبار الشد

يلخص الجدول [2] أهم خواص الفولاذ المدروس التي أمكن الحصول عليها من الاختبار. جدير بالذكر أن عدم الدقة في أجهزة الاختبار وبالتالي عدم الدقة في النتائج تؤدي إلى عدم إمكانية الحصول على قيمة صحيحة لعامل المرونة.

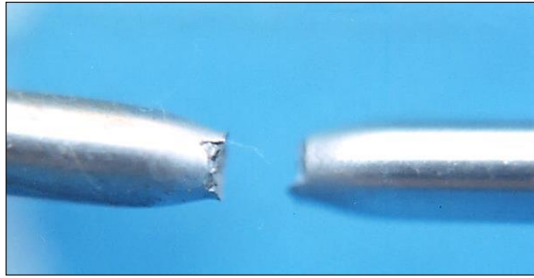
الجدول رقم (2): نتائج اختبار الشد للفولاذ الكربوني Grade X65

| القيمة الناتجة حسب اختبارات مخبر الكلية | خواص الفولاذ الكربوني Grade X65 |
|---|---------------------------------|
| 467 MPa.                                | إجهاد الخضوع $\sigma_y$         |
| 542 MPa.                                | إجهاد الشد الأعظمي $\sigma_u$   |
| -----                                   | عامل المرونة (عامل يونغ)        |
| 19.83%                                  | الاستطالة                       |
| 0.86                                    | نسبة $(\sigma_y/\sigma_u)$      |

يوضح الشكل 2 منحنى الإجهاد-الانفعال الذي تم الحصول عليه ويوضح الشكل 3 منطقة الكسر في عينة الشد.



الشكل رقم (2): منحنى الإجهاد-الانفعال



الشكل رقم (3): منطقة الكسر في عينة الشد

توضح نتائج اختبار الشد أن إجهاد الخضوع وإجهاد الشد الأعظمي للفولاذ الكربوني GradeX65 أكبر بقليل مما هي واردة في المواصفة القياسية وبالتالي فهي تحقق المواصفة والخاصية المطلوبة، وكذلك نجد أن الاستطالة الناتجة في الاختبار توافق مقدار الاستطالة المحددة في المواصفة لهذا النوع من الفولاذ، وعلى ذلك نجد أن المعدن المدروس يحقق المواصفات المطلوبة من اختبار الشد.

#### • اختبار متانة الصدم

أجريت تجربة الصدم على عينات تشاربي مصنوعة من نفس معدن الأنابيب المدروسة، وقد أعطى الاختبار قيمة وسطية لمتانة الصدم قدرها 54.27 Joule كما أبدى المعدن انكساراً أقرب إلى المطيلي منه إلى القصف [5].

#### • اختبار القساوة

أجريت تجربة القساوة على عينات من نفس معدن الأنابيب المركبة في الموقع، وقد أعطت التجربة قيمة وسطية للقساوة قدرها HV=185، وبناء على هذه النتيجة يلاحظ أن معدن الأنابيب يصلح لمثل هذه الأنواع من الاستعمالات.

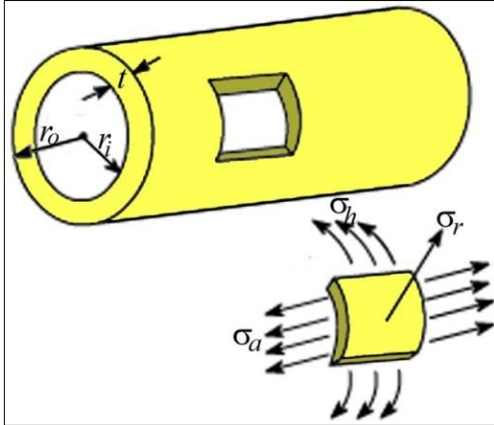
### 3- تحليل الإجهادات Stress analysis

تبحث هذه الفقرة في توزيع الإجهادات المتولدة في جدران ثلاث حالات من أنابيب نقل الغاز ذات أقطار وسماكات مختلفة تحت قيم مختلفة لضغط داخلي مطبق، وستتم الدراسة تحليلياً وعددياً بطريقة العناصر المنتهية FEM باستخدام برنامج التحليل Ansys13. يوضح الجدول [3] أن الحالتين الأولى والثانية تصنفان على أنهما أوعية اسطوانية سميكة الجدار بسبب أن  $r/t \leq 10$  أما الحالة الثالثة فتصنف على أنها وعاء أسطواني رقيق الجدار  $r/t \geq 10$  [6]. جدير بالذكر أن البيانات الواردة في الجدول [3] مأخوذة من محطة حيان لنقل النفط والغاز مكان استثمار الأنابيب المدروسة.

الجدول رقم (3): مواصفات الأنابيب المدروسة

| الضغظ الداخلي [MPa] | تصنيف الأنبوب | $(r_i/t)$ | القطر الخارجي $d_o$ | القطر الداخلي $d_i$ | الحالة   |
|---------------------|---------------|-----------|---------------------|---------------------|----------|
| 4.5                 | سميك الجدار   | 6.34      | 117.4mm             | 101.6mm             | الحالة 1 |
| 18.83               | سميك الجدار   | 6         | 177.8mm             | 152.4mm             | الحالة 2 |
| 88.3                | رقيق الجدار   | 12.7      | 328.8mm             | 304.8mm             | الحالة 3 |

• الأنابيب سميكة ورقيقة الجدار:



الشكل رقم (5) تمثيل الإجهادات على جدار أنبوب سميك الجدار

يوضح الشكل 5 تمثيل الإجهادات على جدار الأنابيب سميكة الجدار أو رقيقة الجدار. تطبق المعادلات (1) التي توضح توزيع الإجهادات على طول سماكة الجدار على الحالتين الدراسيتين الأولى والثانية باعتبارهما أنابيب سميكة الجدار ومفتوحة من الطرفين حيث يكون  $\sigma_a = 0.0$ ، ويلاحظ أن الإجهاد المحيطي هو الأعلى دوماً، كما يلاحظ أن الفرق بين الإجهاد المحيطي والإجهاد النصف قطري ذو قيمة موجبة ثابتة عند نفس نصف القطر  $r$  [6].

|   |                            |                  |                                  |
|---|----------------------------|------------------|----------------------------------|
| $\sigma_h = \frac{P_i \cdot r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{P_i \cdot r_o^2 \cdot r_i^2}{r^2(r_o^2 - r_i^2)}$ |                            |                  | (أ-1)                            |
| $\sigma_a = \frac{P_i \cdot r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)}$  | (الأنبوب مغلق من الطرفين)  | $\sigma_a = 0.0$ | (الأنبوب مفتوح من الطرفين) (ب-1) |
| $\sigma_r = \frac{P_i \cdot r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)} - \frac{P_i \cdot r_o^2 \cdot r_i^2}{r^2(r_o^2 - r_i^2)}$ |                            |                  | (ج-1)                            |
| $u_r = \frac{P_i}{E \cdot r \cdot (r_o^2 - r_i^2)} [r_i^2 \cdot r^2 + (1+\nu)r_o^2 \cdot r_i^2]$              | (الأنبوب مغلق من الطرفين)  |                  | (د-1)                            |
| $u_r = \frac{P_i}{E \cdot r \cdot (r_o^2 - r_i^2)} [(1-\nu)r_i^2 \cdot r^2 + (1+\nu)r_o^2 \cdot r_i^2]$       | (الأنبوب مفتوح من الطرفين) |                  | (ه-1)                            |

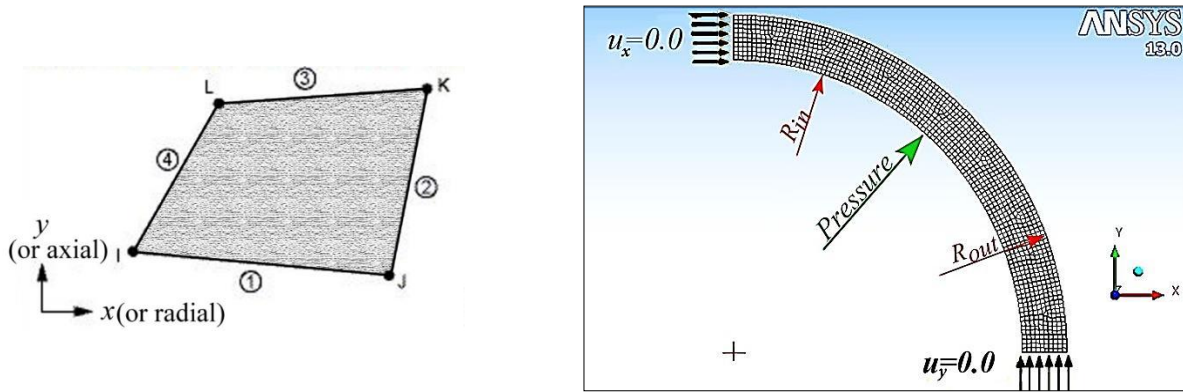
تطبيق المعادلات (2) على الحالة الدراسية الثالثة باعتبارها أنبوب رقيق الجدار [6].

|  |       |
|--|-------|
| $\sigma_h = P \cdot r / t$                                       | (أ-2) |
| $\sigma_a = P \cdot r / 2t$                                      | (ب-2) |
| $\sigma_r = -P; (r = r_i) \text{ \& } \sigma_r = 0.0; (r = r_o)$ | (ج-2) |

تتناول هذه الفقرة الدراسة العددية لتوزيع الاجهادات المتولدة ضمن جدران أنابيب نقل الغاز الموضحة في الجدول [3] وذلك بطريقة العناصر المنتهية FEM باستخدام برنامج تحليل الإجهادات Ansys13 [7]. يظهر الشكل 6 نموذج هندسي ثنائي

البعد للأنبوب المدروس، وقد تم الاستفادة من الشكل التناظري للأنبوب وكذلك ميزة التناظر في الحمولة حيث يمكن رسم ربع مقطع الأنبوب بدلاً من كامل الشكل مما يوفر زمناً ودقة في الحل. وتم افتراض أن مادة الأنابيب linear isotropic وكانت أهم خصائص المادة هي عامل بواسون  $\nu = 0.3$  وعامل المرونة  $E = 210 \times 10^3 \text{ MPa}$ .

يوضح الشكل 7 الشكل العام للعنصر plane182 المستخدم في الدراسة حيث يستخدم هذا العنصر لدراسة حالة الإجهاد المستوي أو الانفعال المستوي أو للحالات التي تمثل الأجسام المتناظرة حول محور. يستخدم العنصر طريقة التكامل الانتقائي المخفض selective reduced integration في الحل. يمتلك هذا النوع من العناصر أربعة عقد بواقع درجتين حرة (درجتا حرية انحرافية في الاتجاهين x و y لكل عقدة). أما بالنسبة للحمولة المطبقة فهي حمولة ضغط داخلي من الصفر حتى قيم ضغط التشغيل الاعظمي.



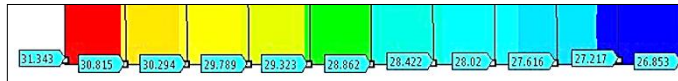
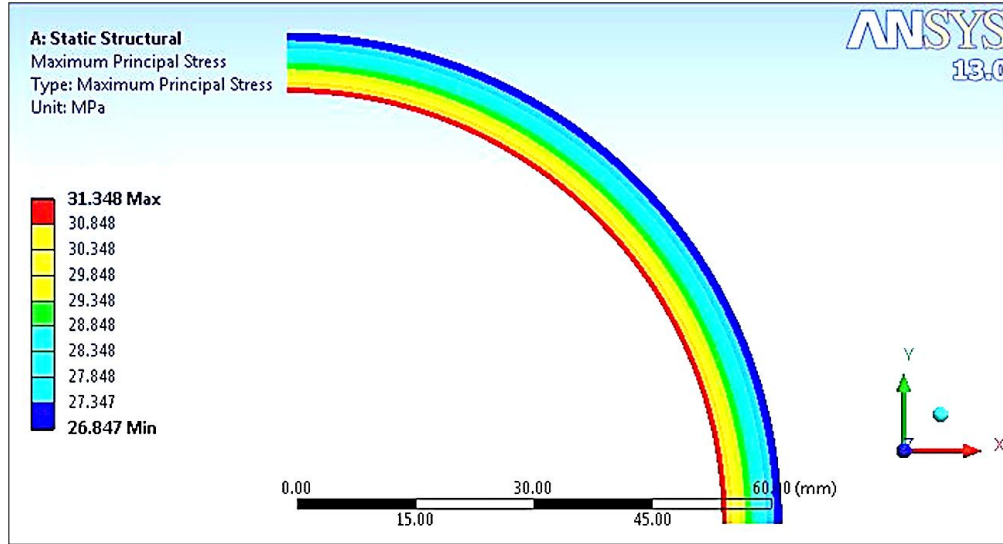
الشكل رقم (6): نموذج هندسي ثنائي البعد للأنبوب المدروس الشكل رقم (7): الشكل العام للعنصر plane182

#### 4- حساب الاجهادات ومقارنة النتائج Stress calculus and results comparison

يوضح الجدول [4] (استناداً إلى المعادلات 1) تغير قيم الإجهادات والانزياح النصف قطري الناتجة تحليلياً ضمن جدار الأنبوب سميك الجدار المصنف في الحالة الأولى، كما يوضح الشكل 8 التوزيع العام للإجهادات وتغير قيم الإجهادات والانزياح النصف قطري الناتجة عددياً لنفس الحالة الأولى.

الجدول رقم (4): تغير قيم الإجهادات والانزياح النصف قطري الناتجة تحليلياً

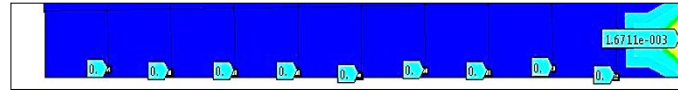
| $u [mm]$ | $\sigma_z [MPa]$ | $\sigma_r [MPa]$ | $\sigma_h [MPa]$ | $x/(r_o - r_i)$ | $r [mm]$ |
|----------|------------------|------------------|------------------|-----------------|----------|
| 0.00791  | 0                | -4.507           | 31.341           | 0               | 50.8     |
| 0.00785  | 0                | -3.962           | 30.796           | 0.1             | 51.59    |
| 0.00781  | 0                | -3.442           | 30.194           | 0.2             | 52.38    |
| 0.00776  | 0                | -2.945           | 29.779           | 0.3             | 53.17    |
| 0.00772  | 0                | -2.469           | 29.303           | 0.4             | 53.96    |
| 0.00768  | 0                | -2.014           | 28.848           | 0.5             | 54.75    |
| 0.00764  | 0                | -1.57            | 28.412           | 0.6             | 55.54    |
| 0.0076   | 0                | -1.16            | 27.994           | 0.7             | 56.33    |
| 0.00756  | 0                | -0.76            | 27.594           | 0.8             | 57.12    |
| 0.00753  | 0                | -0.376           | 27.21            | 0.9             | 57.91    |
| 0.0075   | 0                | 0                | 26.841           | 1.0             | 58.7     |



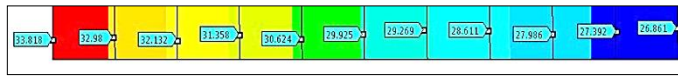
الإجهاد المحيطي  $\sigma_h [MPa]$



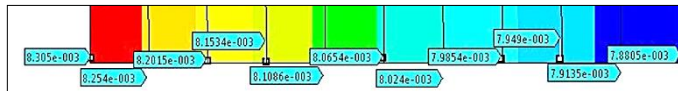
الإجهاد النصف قطري  
 $\sigma_r [MPa]$



الإجهاد المحوري  $\sigma_z [MPa]$



الإجهاد المكافئ von-Mises



الانزياح النصف قطري  $u [mm]$

الشكل رقم (8): توزيع الإجهادات والانزياح عددياً للحالة الأولى.

يوضح الجدول [5] التطابق الجيد والمقبول بين الطريقتين التحليلية والعددية في قيم الإجهادات والانزياح النصف قطري في جدار الأنبوب رقيق الجدار المصنف في الحالة الثالثة.

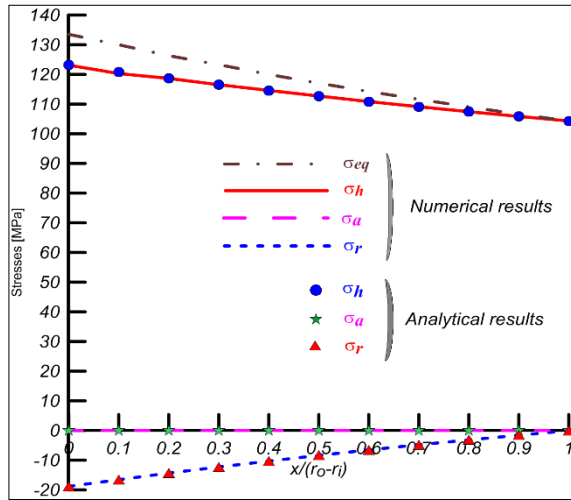
الجدول رقم (5): الإجهادات والانزياح النصف قطري في جدار الأنبوب للحالة الثالثة

| الحل     | $r [mm]$ | $\sigma_h [MPa]$ | $\sigma_r [MPa]$ | $\sigma_z [MPa]$ |
|----------|----------|------------------|------------------|------------------|
| التحليلي | 152.4    | 112.14           | -8.83            | 0                |
| العددي   | 152.4    | 114.7            | -8.83            | 0                |

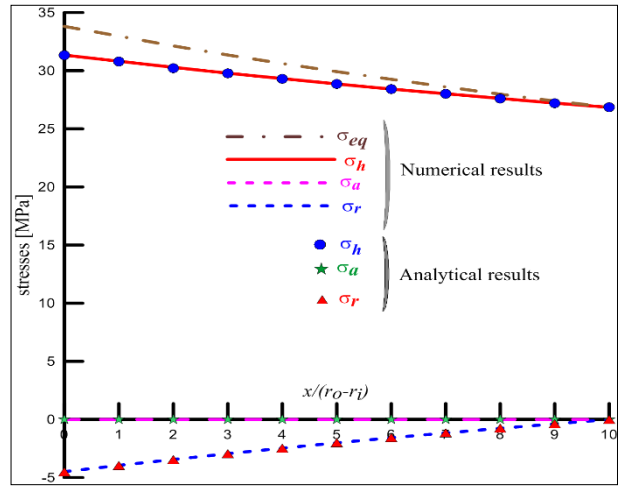
يعبر الشكل 9 عن التمثيل البياني لتوزيع الإجهادات على طول سماكة جدار الأنبوب للحالتين الأولى والثانية، حيث يوضح الشكل تطابقاً كبيراً في توزيع الإجهادات على طول جدار الأنبوب بين الطريقتين التحليلية والعددية سواء للحالة الأولى أو الحالة الثانية، كما توضح النتائج أن الإجهاد المكافئ يكون دوماً أقل من نصف إجهاد الخضوع لمعدن الأنبوب  $\sigma_{eq} < (\sigma_y/2)$  حتى عند الجدار الداخلي للأنبوب وهذا يعني الاستخدام الآمن للأنبوب في الحالتين.



ويعبر الشكل 10 عن التمثيل البياني للانزياح النصف قطري على طول سماكة جدار الأنبوب للحالتين الأولى والثانية، حيث يوضح الشكل تقارب النتائج بشكل جيد بين الطريقة التحليلية والطريقة العددية في قيم الانزياح النصف قطري المتولد على جدار الأنبوب سواء للحالة الأولى أو الحالة الثانية.

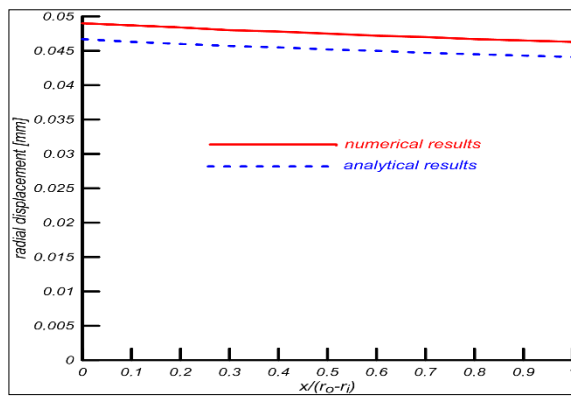


(الحالة الثانية)

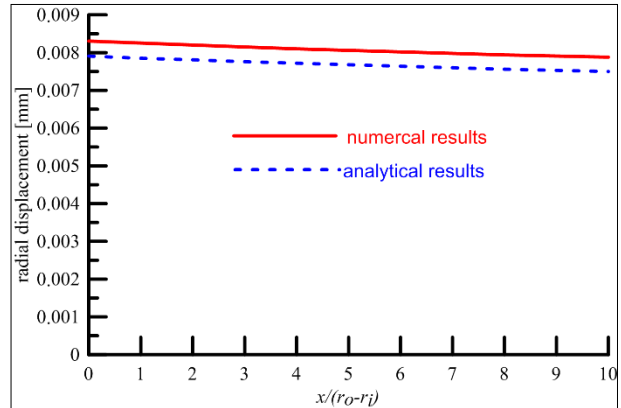


(الحالة الأولى)

الشكل رقم (9) توزيع الإجهادات على طول سماكة جدار الأنبوب للحالتين الأولى والثانية



(الحالة الثانية)



(الحالة الأولى)

الشكل رقم (10): الانزياح النصف قطري على طول سماكة جدار الأنبوب للحالتين الأولى والثانية

## 5- عامل شدة الإجهاد Stress intensity factor

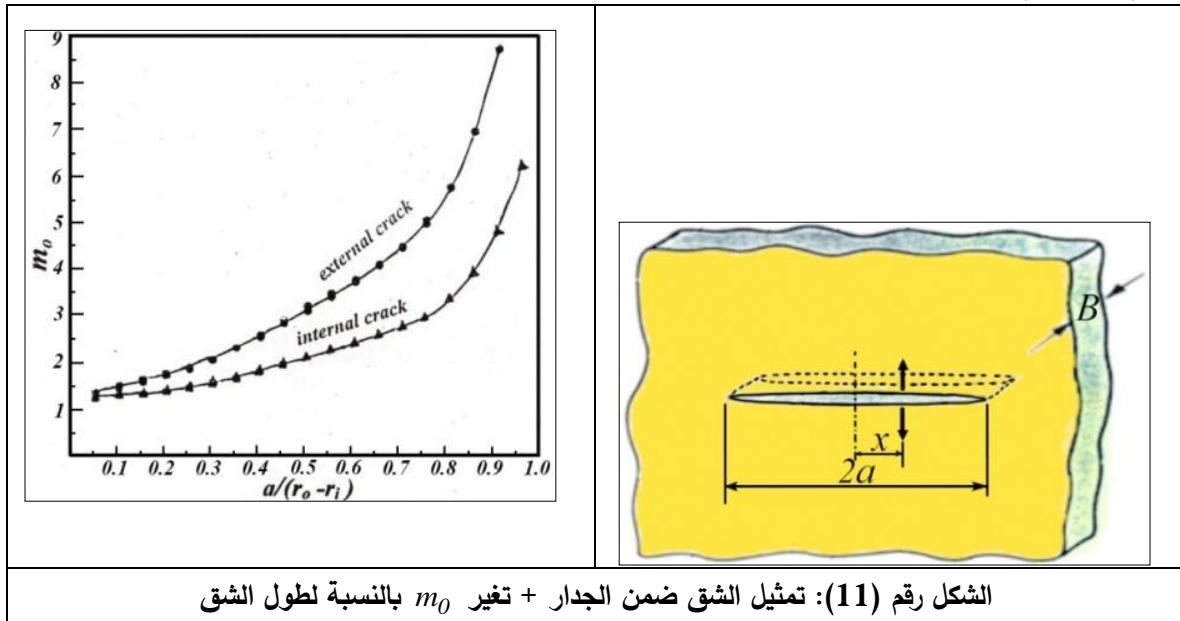
تميل عمليات تطبيق الضغط الداخلي المتكرر ضمن الأنابيب إلى توليد الشقوق على السطح الداخلي للأنبوب، ولمعرفة معدل نمو الشقوق وبالتالي معرفة العمر الآمن للأنبوب لابد من معرفة عامل شدة الإجهاد  $K_I$  والذي سيؤدي إلى فتح قمة الشق. سيتم حساب عامل شدة الإجهاد تحليلياً باستخدام طريقة عامل الوزن weight function method وعددياً باستخدام طريقة العناصر المنتهية للتأكد من متانة الأنابيب للحمولات المطبقة، ومن ثم حساب العمر المتوقع للأنبوب فيما لو طبقت هذه الحمولة بشكل دوري بوجود شقوق على جدار هذا الأنبوب.

• حساب عامل شدة الإجهاد باستخدام طريقة عامل الوزن

يمكن حساب قيمة عامل شدة الإجهاد في جسم ما حاوياً على شق باستخدام طريقة عامل الوزن، والتي تعتبر طريقة تحليلية وذلك من خلال معرفة توزيع الإجهادات في نفس الجسم عندما لا يحتوي على أي شق. يعطى عامل شدة الإجهاد من خلال طريقة عامل الوزن بالمعادلة:

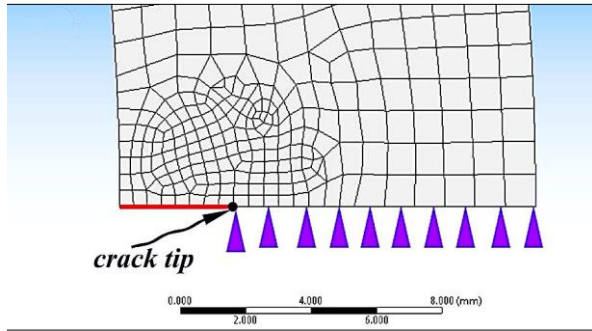
$$K = \int_0^a \sigma(x) \times \frac{2\sqrt{(a/\pi)}}{\sqrt{a^2 - x^2}} \times \left[ m_0 - (m_0 - 1) \left( \frac{x}{a} \right) \right] \quad (12-5)$$

حيث تدل  $\sigma(x)$  على توزيع الإجهادات الناعمية في نفس مستوي الشق فيما لو لم يكن يوجد شق في الجسم،  $a$  نصف طول الشق،  $m_0$  ثابت تعتمد قيمته على نسبة طول الشق بالنسبة لسماكة الوعاء الأسطواني، وكذلك فيما إذا كان الشق داخلي أم خارجي كما هو موضح بالشكل 11 [8].

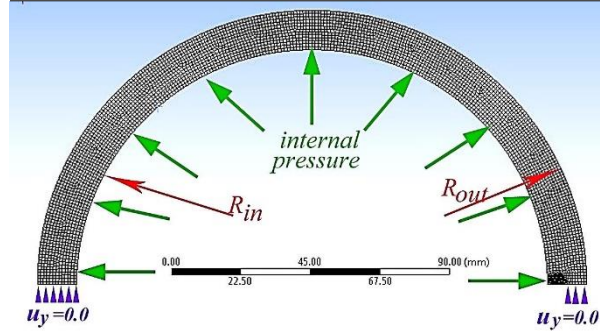


• حساب عامل شدة الإجهاد بطريقة العناصر المنتهية

تتناول هذه الفقرة حساب عامل شدة الإجهاد  $K_I$  المتولد عند رأس الشق عند أعماق مختلفة للشقوق بطريقة العناصر المنتهية باستخدام Ansys 13 (اعتماداً على mechanical APDL solver). حيث يفيد معرفة قيمة  $K_I$  في تقدير معدل نمو الشق تحت تأثير الحمولات الدورية المتكررة. كذلك تتناول هذه الفقرة حساب عدد مرات التحميل  $N$  [cycles] التي يمكن تطبيقها على الأنبوب قبل أن يصل إلى مرحلة التعب. وقد تم اختيار العنصر 8-node plane183 و هذا النوع من العناصر يستخدم طريقة interaction integral في التحليل الرياضي حيث تستخدم هذه العناصر لدراسة حالة الأجسام المتناظرة حول محور، كما تم افتراض مادة الأنابيب linear isotropic حيث عامل المرونة  $E = 210 \times 10^3 \text{ MPa}$  وعامل بواسون  $\nu = 0.3$ . تم تمثيل الشق ضمن النموذج بأن تركت العقد الموجودة ضمن الشق بدون أي تحديد أو تقييد لحركتها. يظهر الشكل 12 نموذج هندسي ثنائي البعد للأنبوب المدروس، حيث يستفاد من الشكل التناظري للأنبوب والحمولة. كما يوضح الشكل 13 وجود الشق على السطح الداخلي للأسطوانة، حيث يُرمز لعمق الشق بالرمز  $a$ .

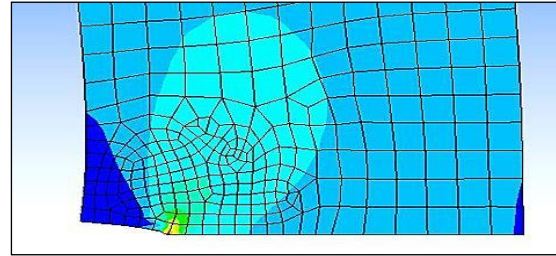
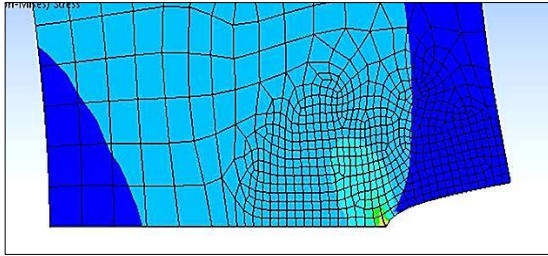


الشكل رقم (13) وجود الشق على السطح الداخلي للأنبوب



الشكل رقم (12) نموذج هندسي ثنائي البعد للأنبوب المدروس

يوضح الشكل 14 أن الإجهاد المكافئ الأعظمي وفق قاعدة فون-ميسسز يتولد عند قمة الشق تحت تأثير ضغط داخلي قدره  $P_i = 18.83MPa$  بوجود شق طوله  $(a/t) = 0.3$  سواء كان هذا الشق داخلياً أو خارجياً.



الشكل رقم (14): توزيع الإجهاد المكافئ وفق قاعدة فون-ميسسز في منطقة الشق لشق داخلي وخارجي

## 6- النتائج Results

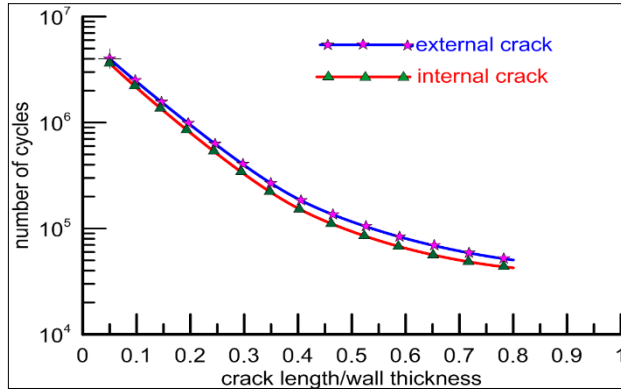
تظهر الأشكال 15 و17 و19 المخططات التي توضح تغير قيمة عامل شدة الإجهاد  $K_I$  (المحور  $y$ ) عند تغير قيمة عمق الشق  $a$  (المحور  $x$ ) ضمن جدار الأنبوب، وفي جميع الحالات يظهر أن قيمة عامل شدة الإجهاد تتزايد بشكل غير خطي مع تزايد قيمة عمق الشق. كما يظهر تقارب النتائج بشكل جيد بين طريقة العناصر المنتهية وبين طريقة عامل الوزن لكلتا الحالتين (حالة شق داخلي وحالة شق خارجي).

كذلك تظهر الأشكال 16 و18 و20 المخططات التي توضح عدد مرات التحميل (المحور  $y$ ) التي يمكن تطبيقها على الأنبوب في كل حالة قبل أن يصل إلى مرحلة التعب عند أطوال مختلفة للشق (المحور  $x$ )، حيث تظهر المخططات أن عدد مرات تطبيق الحمولة سيكون أكبر من أجل الشق الأصغر والعكس بالعكس، كما يلاحظ أن خطورة الشقين الداخلي والخارجي متساوية بشكل عام من حيث عدد مرات تطبيق الحمولة المسموح.

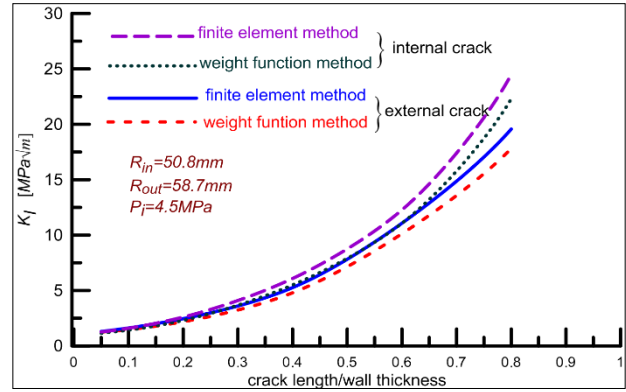
**ملاحظة:** في جميع المخططات الستة المذكورة تم إنهاء المخطط البياني عند عمق شق  $a$  قيمته الأعظمية 80% من سماكة جدار الأنبوب المدروس، لأن عمق شق أكبر من ذلك تكون النتائج لا معنى لها، لأنه عند مثل هذا العمق للشق يكون الأنبوب قد خرج عن الخدمة فعلاً.

• **الحالة الأولى:** ضغط التشغيل يتأرجح بين القيمتين  $P_i = 0.0MPa$  و  $P_i = 4.5MPa$

يوضح الشكل 15 أن جميع قيم عامل شدة الإجهاد في هذه الحالة أقل بكثير من قيمة متانة الانكسار  $K_{IC} = 142 MPa\sqrt{m}$  لمعدن الأنابيب steel x65 [9] وهذا يعني أن الأنبوب لن يحصل لها أي تحطم أو انكسار مفاجئ تحت تأثير الضغط المطبق حتى لو وصل الشق إلى القطر الخارجي للأنبوب، بل سوف يحصل تسرب leakage للمادة الموجودة داخل الأنبوب.

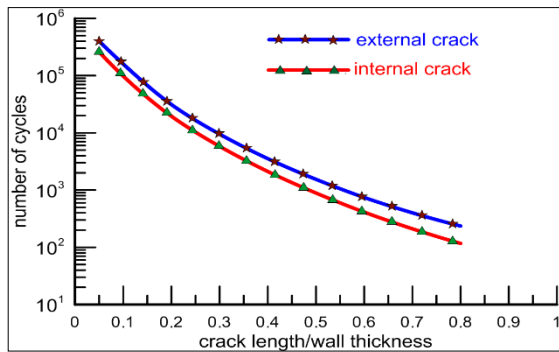


الشكل رقم (16) عدد مرات التحميل مقابل طول الشق للحالة الأولى

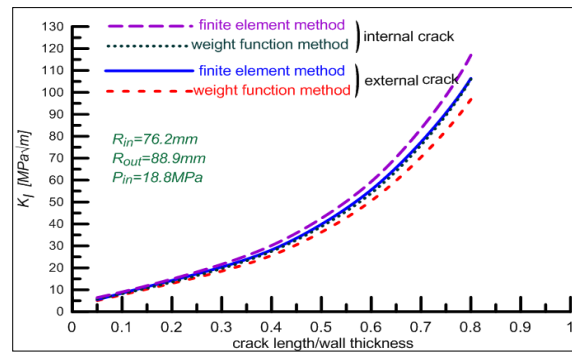


الشكل رقم (15): تغير قيمة عامل شدة الإجهاد  $K_I$  للحالة الأولى

- الحالة (2): ضغط التشغيل يتأرجح بين القيمتين  $P_i = 18.85MPa$  و  $P_i = 0.0MPa$  يوضح الشكل 17 خطورة حصول الانكسار للأنبوب محتملة عند بلوغ طول الشق المقدار  $(a/t) = 0.8$  وذلك بسبب اقتراب قيم  $K_I$  من قيمة  $K_{IC}$  وهذا يعني أن الأنابيب لن يحصل لها انكسار مفاجئ تحت تأثير الضغط المطبق ولكن عند زيادة عمق الشق فإن النتائج غير مضمونة.

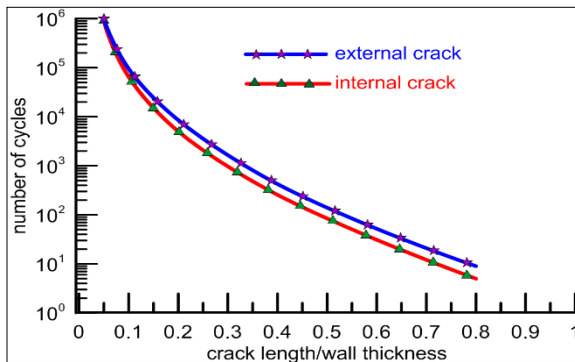


الشكل رقم (18) عدد مرات التحميل مقابل طول الشق للحالة الثانية

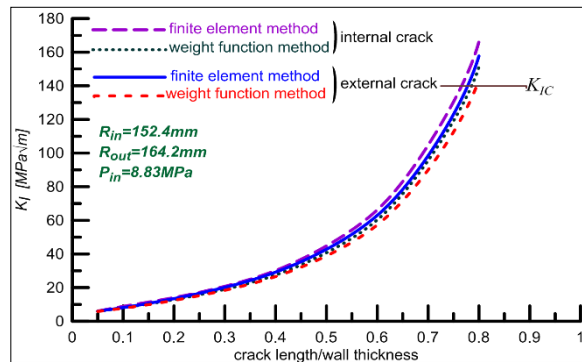


الشكل رقم (17) تغير قيمة عامل شدة الإجهاد  $K_I$  للحالة الثانية

- الحالة (3): ضغط التشغيل يتأرجح بين القيمتين  $P_i = 8.83MPa$  و  $P_i = 0.0MPa$  يوضح الشكل 19 أن حصول الانكسار للأنبوب حتمي حتى قبل وصول طول الشق المقدار  $(a/t) = 0.8$  وذلك بسبب اكتساب  $K_I$  نفس قيمة  $K_{IC}$ ، كما يلاحظ أنه عند طول شق متقدم يكون من شبه المستحيل تطبيق حمولة الضغط الداخلي بشكل دوري لأن ذلك سيؤدي حتماً إلى حدوث انهيار تحت تأثير التعب.



الشكل رقم (20): عدد مرات التحميل مقابل طول الشق للحالة الثالثة



الشكل رقم (19): تغير قيمة عامل شدة الإجهاد  $K_I$  للحالة الثالثة

## 7- الاستنتاجات Conclusion

أهم النتائج التي نخلص إليها والتوصيات التي يمكن طرحها من خلال دراسة الحالات الثلاث للأنايبب الموجودة والمستثمرة في إحدى محطات نقل الغاز هي:

✳️ لوحظ عند إجراء الاختبارات المختلفة لمادة الأنايبب أن الخواص الميكانيكية الناتجة تحقق الخواص المطلوبة والمذكورة ضمن المواصفة القياسية API-5L.

✳️ بحساب الإجهادات المتولدة ضمن جدار الأنايبب لوحظ التطابق الجيد بين الحسابات التحليلية والحسابات العددية، كما لوحظ أن الإجهاد المكافئ أقل بشكل واضح من إجهاد الخضوع في الحالات الثلاث، حيث يؤمن هذا الأمر إمكانية تطبيق الحمولة بشكل دوري (بدون وجود شق في الجدار) لعدد كبير من المرات دون خوف من حصول الانهيار تحت تأثير التعب.

✳️ في حالة وجود شق ضمن جدار الأنبوب لوحظ بشكل عام أن قيم عامل شدة الإجهاد المتولدة متقاربة في القيم سواء في الدراسة التحليلية أو الدراسة العددية لكل حالة، كما لوحظ تقارب القيم في حالة وجود الشق الداخلي أو الشق الخارجي، ولو أن قيم  $K_I$  في حالة الشق الخارجي أقل بقليل من حالة وجود شق داخلي. هذا الأمر أدى بشكل عام إلى أن تكون عدد مرات تطبيق الحمولة المسموح بها أكثر بقليل في حالة وجود شق خارجي عما هو عليه في حالة وجود شق داخلي، ولكن بشكل عام تعتبر خطورة الشقين متساوية.

▪ في الحالة الأولى يظهر واضحاً أن قيم  $K_I$  المتولدة أقل من قيم  $K_{IC}$  لمعدن الأنايبب وهذا يعني أن الأنايبب لن يحصل لها انكسار مفاجئ تحت تأثير الضغط المطبق حتى لو وصل الشق إلى السطح الخارجي للأنبوب، بل سوف يحصل تسرب للمادة الموجودة داخل الأنبوب.

▪ في الحالة الثانية يلاحظ أن خطورة حصول الانكسار للأنبوب محتملة عند بلوغ طول الشق المقدار  $(a/t) = 0.8$ ، وذلك بسبب اقتراب قيم  $K_I$  من قيمة  $K_{IC}$ .

▪ في الحالة الثالثة يلاحظ أن حصول الانكسار للأنبوب حتمي حتى قبل وصول طول الشق المقدار  $(a/t) = 0.8$  وذلك بسبب اكتساب  $K_I$  نفس قيمة  $K_{IC}$ ، كما يلاحظ أنه عند طول شق متقدم يكون من شبه المستحيل تطبيق حمولة الضغط الداخلي بشكل دوري لأن ذلك سيؤدي حتماً إلى حدوث الانكسار تحت تأثير الحمولة المطبقة وليس تحت تأثير التعب.

**References:**

- 1- Govindjee, S., (2013), "Engineering mechanics of deformable solids", Oxford University Press.
- 2- Anderson, T. L., (1991), "Fracture Mechanics Fundamentals and Applications", CRC Press, Inc, USA.
- 3- Broek, D. S., (1989), "The Practical Use of Fracture Mechanics", Kluwer academic publishers Netherlands.
- 4- API specification 5L, (2000), American Petroleum Institute, forty-second edition.
- 5- ASTM Standard, (1978), " Standard methods for notched bar impact testing of metallic materials", E-23.
- 6- R. C. Hibbeler, (2011), "Mechanics of materials", eighth edition, Prentice Hall.
- 7- ANSYS version 13, (2014).
- 8- Moftakhar, A. A., and Glinka, G., (1992), " Calculation of stress intensity factors by efficient integration of weight functions", Eng. Fract. Mech., Vol. 43, No.5, pp 749-756.
- 9- Capelle, J., Et. Al., (2010), "Hydrogen effect on fatigue and fracture of pipe steels, France.
- 10- Irmund, M. C., (2011), Ansys® Verification Manual, Stress Analysis Systems, Inc. Krieger.
- 11- Stacey, A., and Webster, G. A., (1988), "Stress Intensity factors caused by residual stress fields in autofrettaged tubing", ASTM, Philadelphia, pp. 37-53.
- 12- Shiu-Chuan and Hao-Hi Chang., (2015), "Stress intensity factor of a semi-elliptical crack in a hollow cylinder", Transaction of the Canadian Society for Engineering, Vol. 39, No. 3.