مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية - سلسلة العلوم الهندسية المجلد (21) العدد (8) 1999
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research –Engineering Science Series Vol. (21) No (8) 1999

تقييم العزم المسبب للتشقق في العناصر الخرسانية المسلحة المعرضة للانحناء

الدكتور غاندي علي جحجاح*

(ورد إلى المجلة في 1998/8/30، قبل للنشر في 1999/3/24)

□ الملخّص □

تعتبر دراسة التشقق في العناصر الخرسانية المسلحة من المسائل ذات الأهمية الخاصة، باعتبار أن التشقق يؤثر في سلوك هذه العناصر، ويقلل من قدرة تحملها، ويعيق الاستثمار السليم لهذه العناصر.

يؤثر العزم المسبب للتشقق بشكل كبير في دقة تقييم السهوم الحاصلة في العناصر الخرسانية المسلحة المعرضة للانحناء، لذلك فإن التقييم الصحيح للعزم المسبب للتشقق، يساهم بشكل كبير في زيادة دقة تقيم السهوم، وتوجد طرق مختلفة في الكودات لتقييم العزم المسبب للتشقق وعزم العطالة الفعال وبالتالي السهوم الحاصلة في العناصر المعرضة للانحناء .

يتضمن هذا البحث دراسة تحليلية للعزم المسبب للتشقق، والسهوم، في العناصر الخرسانية المسلحة، وقد تم التركيز على دراسة العزم المسبب للتشقق وطرق تقييمه، والمقارنة بين القيم التجريبية للعزم المسبب للتشقق والقيم الحسابية الناتجة وفق الكود الروسي SNIP والكود الأمريكي ACI-318-89، بهدف التوصل إلى تقييم دقيق للعزم المسبب للتشقق والسهوم الحاصلة في العناصر الخرسانية المسلحة المعرضة للانحناء .

* مدرس في قسم الهندسة الإنشائية – كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.

مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية - سلسلة العلوم الهندسية المجلد (21) العدد (8) 1999
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research –Engineering Science Series Vol. (21) No (8) 1999

Evaluation of Cracking Moment in ReinforcedConcrete Flexural Members

Dr. Ghandi Ali JAHJAH*

(Received 30/8/1998, Accepted 24/3/1999)

❐ ABSTRACT ❐

The study of cracking in reinforced concrete members has a special importance, because cracking affects the behavior of these members and reduces their capacity and serviceability.

The cracking moment of the reinforced concrete flexural member's greatly affects the accuracy of determining their deflection. The exact value of the cracking moment provides a more accurate determination of deflection.

There are various methods in codes to determine the cracking moment, effective moment inertia, and deflection.

This paper will lay emphasis on the following ideas:

- *An analytical study for flexural cracking moment and deflection in reinforced concrete members.*
- *The methods of evaluating cracking moment and deflections.*
- *The comparison between the experimental and theoretical values of the cracking moment according to Russain (SNIP) and American (ACI – 318 – 89) codes.*
- *Determination the factors which have an influence on the cracking moment and deflections.*

* Lecturer at Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

I ــ مقدمة:

يتطلب تصميم العناصر الخرسانية المسلحة المعرضة للانحناء البسيط، تأمين المتانة والمقاومة الكافية لتحمل القوى والمؤثرات الخارجية، ويتم ذلك كما هو معلوم باختيار أبعاد وتسليح كاف وإستخدام مواد (خرسانة وفولاذ تسليح) ذات مقاومات كافية، أما ضمان سلامة تشغيل واستثمار العناصر الخرسانية المسلحة، وبالتالي ضمان سلامة تشغيل واستثمار المنشآت الخرسانية المسلحة، فيعتمد على ضمان قيم لعرض الشقوق والإزاحات الانتقالية والدورانية ضمن الحدود المسموح بها والتي لا تعيق أداء المنشأ لأغراضه الرئيسية التي أنشئ من اجلها.

لقد زادت أهمية دراسة التشوهات والتشققات وخاصة تحديد العزم المسبب للتشقق والسهوم الحاصلة بعد التطور الكبير في نوعية المواد المستخدمة في العقود الثلاثة الأخيرة، حيث انتشر استخدام فولاذ تسليح بمقاومات عالية، وكذلك خرسانة عالية المقاومة مما ساهم في إمكانية تصميم عناصر خرسانية مسلحة بمقاطع عرضية صغيرة الأبعاد، وبالتالي تزايد احتمال حدوث سهوم كبيرة في هذه العناصر، وهذا ما أعطى دراسة السهوم والتأكد من سلامة العناصر في ظروف الاستثمار أهمية كبيرة [1].

إن عدم المعرفة الدقيقة للتغيرات البنيوية، التي تحصل في الخرسانة وفولاذ التسليح عندما تتعرض العناصر الخرسانية المسلحة لتأثير حمولات مختلفة، وكذلك الطبيعة المعقدة لتوزيع الإجهادات بين التسليح والخرسانة، جعل دراسة السهوم والتشققات وغيرها من التشوهات مسألة لا تخلو من الصعوبة والتعقيد، لذلك فإن أغلب الطرق المعروفة في الكودات المختلفة تعتمد علاقات تقريبية.

في هذا البحث نتعرض لدراسة تحليلية، لتقييم العزم المسبب للتشقق في العناصر الخرسانية المسلحة المعرضة للانحناء استناداً إلى المواصفات القياسية الأمريكية والروسية، بهدف التوصل إلى الطريقة التي تعطي التقييم الأدق للعزم المسبب للتشقق وبالتالي للسهوم الحاصلة في هذه العناصر.

II ــ تأثير العزم المسبب للتشقق في دقة تقييم السهوم في العناصر الخرسانية المسلحة المعرضة للانحناء:

معلوم أن صلابة الانحناء للعناصر الخرسانية المسلحة المعرضة للانحناء، تتغير تبعاً لقيمة عزوم الانحناء المؤثرة، حيث في المراحل الموافقة لعزوم انحناء أقل من العزم المسبب للتشقق، يكون عزم عطالة المقطع العرضي، وبالتالي صلابة المقطع العرضي غير المتشقق أكبر من

قيمـتها بعد ظهور التشققات العمودية على المحـور الطولـي للعنصر وباعتبار تقييم السـهوم يعـتمد بشكل رئيسي على عزم عطالة المقطع العرضي حيث تحدد السهوم باسـتخدام علاقـات حسـاب الإنشـاءات المعروفة ذات الشكل العام [2]:

$$f = \beta \frac{M.L^2}{EI} \qquad (1)$$

حيث:

β ــ معـامل يعـتمد عـلى نوع وطبيعة الاستناد للعنصر المدروس.

I ــ عـزم عطالـة المقطـع الخرساني، وتختلف هذه القيمة تبعاً لوجود تشققات في المقطع أو عدمها.

M ــ عـزم الانحـناء المؤثر في المقطع المدروس.

L ــ المجاز الحسابي للعنصر المدروس.

فإن دقة حساب عزم العطالة، يقود إلى تقيم دقيـق للسـهوم الحاصـلة فـي العنصر الخرساني المسلح المعرض للانحناء.

حـتى عام 1971 كان يُعتمد عزم العطالة الكلي للمقطع غير المتشقق، وعزم العطالة المكافئ للمقطع المتشقق بعد ظهور الشـقوق العموديـة على المحور الطولي للعنصـر بهدف تقييم السهوم في العناصر الخرسانية المسلحة المعرضة للانحناء، إلا أنـه تبين أن استخدام عزم عطالة المقطع الكـلي لحساب السهوم، يعطي قيماً أقل من الفعلية الحاصلة في ظروف الاستثمار، في حيـن ينـتج عـن استخدام عزم العطالة المكـافئ قيم أكبر من الفعلية، مما أعطى أهميـة خاصة للتحديد الدقيق لعزم العطالة لضـمان تقيـم دقيق للسهوم في العناصر الخرسانية المسلحة المعرضة للانحناء.

اسـتناداً إلى مجموعـة مـن الاختـبارات والدراسـات التي أجريت في هـذا المجال، اقترح Branson [3،4،5] علاقـة لحسـاب عزم العطالة الفعال I_e، وهو يأخذ بالاعتبار درجة التحميل، ودرجة التشـقق الحاصـلة فـي المقطع العرضي العمـودي عـلى المحور الطولي للعناصر الخرسانية المسلحة المعرضة للانحناء :

$$I_e = (\frac{M_{cr}}{M_a})^3 I_g + [1-(\frac{M_{cr}}{M_a})^3] I_{cr} \le I_g \qquad (2)$$

في هذه العلاقة :

M_{cr}، M_a – العزم المسبب للتشقق وعزم الانحناء المؤثر في المقطع المدروس على التوالي،

I_g– عـزم العطالة للمقطع الكلي حـول المحور المار من مركز ثقل المقطع (مع إهمال التسليح في المقطع).

I_{cr} – عـــزم عطالـــة المقطـــع الخرساني المكافئ للمقطع المتشقق بالنسبة للمحور المحايد.

بعد ذلك اقترح Branson، Trost [6] تعديـــلا على العلاقة (2)، بحيث يمكن استخدامها للعناصر مسبقة الإجهاد أو ذات الشد الجزئي لتصبح بالشكل:

$$I_e = (\frac{M_{cr} - M_{o\Phi}}{M_a - M_{o\delta}})^3 I_g + [1 - (\frac{M_{cr} - M_{o\Phi}}{M_a - M_{o\delta}})^3] I_{cr} \le I_g \quad (3)$$

حيث:

$M_{o\Phi}$ – العزم الخارجي المؤثر في المقطع الحرج والمسبب لتقوس مقداره صفر،

$M_{o\delta}$ – العـــزم في المقطع الحرج المسبب لســـهم فـــي الكمرة مساوٍ للصفر (أو جزء العزم المطبق الموازن للسهم العكسي الذي تســـببه قـــوة ســـبق الإجهـــاد عندما تؤثر وحدها)،

I_{cr} – عـــزم العطالـــة المكافئ للمقطع المتشـــقق بالنســـبة إلى المحـــور المحايد باعتبار قوة سبق الإجهاد مساوية للصفر.

واقـــترح Tadros [7] علاقـــة لحساب عزم العطالة الفعال مشابهة للعلاقة (3) أخذت الشكل :

$$I_e = (\frac{M_{cr} - M_{dec}}{M_a - M_{dec}})^3 I_g + [1 - (\frac{M_{cr} - M_{dec}}{M_a - M_{dec}})^3] I_{cr} \le I_g \quad (4)$$

علماً أن :

M_{dec} – العـــزم الخـــارجي فـــي المقطع الحرج المدروس المسبب لإجهادات تساوي الصـــفر، في الألياف الخرسانية المعرضة للضغط من تأثير قوة سبق الإجهاد،

I_{cr}– عـــزم العطالـــة المكافئ للمقطع المتشـــقق بالنســـبة إلى المحور المار من مركز ثقل المقطع المتشقق.

واســـتمراراً في تطوير طريقة عزم العطالـــة الفعال، للمقاطع المتشققة العمودية عـــلى المحـــور الطولي في حالة العناصر الخرسانية المسلحة مسبقة الإجهاد، أو ذات الشـــد الجـــزئي، فقـــد اقترح Harajli , Alameh [8] فـــي عـــام 1989 علاقة لتقييم عزم العطالة الفعال بالشكل:

$$I_e = \frac{I_{cra}}{1 - \frac{M_{cr}}{M_a}(1 - \frac{I_{cra}}{I_g})} \quad (5)$$

M_{cr}– العزم المسبب للتشقق ويشمل ضمنه تأثير قوة سبق الإجهاد،

I_{cra}–عـــزم العطالـــة المكـــافئ لـــلمقطع المتشقق منسوباً إلى المحور المحايد.

وقـد اعتمد الكود الأمريكي [9] العلاقة (2) لحسـاب عزم العطالة الفعال منذ عام 1971، كما أن الكود العربي [10]، والكود العـربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسـانية [11]، قد اعتمدا هذه العلاقة، لـتقييم السـهوم فـي العناصر الخرسانية المسلحة بعد ظهور التشققات العمودية على المحـور الطولـي، لكـنهما لم يتعاملا مع العناصـر الخرسـانية المسـلحة مسـبقة الإجهاد، أو ذات الشد الجزئي .

نلاحـظ مـن العلاقات المذكورة أعـلاه، أن العـزم المسبب للتشقق يؤدي دوراً هاماً في حساب عزم العطالة الفعال، وبالتالي في تقييم السهوم الحاصلة، ويؤدي الـتقييم الدقيق للعزم المسبب للتشقق إلى دقة في حساب عزم العطالة الفعال وبالتالي إلى دقة في تقييم السهوم الحاصلة.

لذلك تركز اهتمامنا في هذا البحث عـلى دراسـة بعض طرق حساب العزم المسـبب للتشـقق والعوامل المؤثرة على تقييم العزم المسبب للتشقق.

III ــ حسـاب العزم المسبب للتشقق في العناصـر الخرسـانية المسلحة المعرضة للانحناء:

الطريقة المعتمدة في كل من الكود الروسـي SNIP [12]، والكود الأمريكي ACI Code [9]، عـند تحديـد العـزم المسـبب للتشـقق M_{cr}، هي طريقة عزم الـنواة، لكنهما يختلفان في الأسلوب المتبع في كل منهما.

فالمواصـفات القياسـية الروسية SNIP[12] تقترح أن يحدد العزم المسبب للتشقق M_{cr} بالعلاقة:

$$M_{cr} = R_{bt,ser}.W_{pl} \qquad (6)$$

حيث إن :

$R_{bt,ser}$ - إجهـادات الشـد القصـوى في الخرسانة عند الانحناء،

W_{pl} - عـزم مقاومـة المقطـع الخرساني المسلح المرن اللدن في منطقة الشد.

وتحدد قيمة W_{pl} مع الأخذ بالاعتبار العمل المـرن لخرسـانة منطقة الضغط، والعمل اللدن لخرسانة منطقة الشد [14, 13, 12] وذلك بالعلاقة:

$$W_{pl} = \frac{[2(I_{bo} + \alpha I_{so} + \alpha I'_{so})]}{h - x} + S_{bt} \quad (7)$$

علماً أن:

I'_{so}, I_{so}, I_{bo} -عزوم العطالة بالنسبة إلى محور التعادل لمساحة مقطع خرسانة منطقة الضغط، فولاذ التسليح الواقع في منطقة الشد، وفولاذ التسليح الواقع في منطقة الضغط على التوالي،

h- ارتفـاع المقطـع العرضـي للعنصر الخرساني،

x- ارتفـاع خرسـانة منطقة الضغط عند التشقق،

α- أمـثال التعادل (modulur ratio)

$\alpha = \frac{E_s}{E_c}$،

S_{bt}- العـــزم الســـتاتيكي لمساحة خرسانة منطقة الشد بالنسبة إلى محور التعادل.

أمـــا الكـــود الأمريكي ACI [9] Code، فيعتمد العلاقة التالية، لتحديد العزم المســـبب للتشـــقق في العناصر الخرسانية المعرضـــة للانحناء المسلحة بتسليح عادي (خالٍ من الإجهاد المسبق).

$$M_{cr} = \frac{I_g}{y_b} f_r \quad (8)$$

حيث إن:

f_r- قيمـــة إجهـــادات الشـــد القصوى في الخرسانة عند الانحناء،

y_b- بعد الليف الخرساني المشدود، الأكثر إجهادا، عن مركز ثقل المقطع الخرساني..

تأخذ المعادلة (6) المذكورة أعلاه بالاعتبار مجموعة من المؤثرات أهملت في العلاقة (8)، فمثلاً العلاقة (8) تهمل تأثير تواجد وكثافة فولاذ التسليح في المقطع العرضي، وتتعامل فقط مع المقطع الخرساني. في حالة العناصر الخرسانية المسلحة مسبقة الإجهاد جزئياً أو كلياً، يتم تحديد العزم المسبب للتشقق بأسلوب مشابه لما ذكر سابقاً في العناصر ذات التسليح العادي، مع أخذ تأثير قوة سبق الإجهاد بالاعتبار، فالكود الأمريكي [9] يحدد العزم المسبب للتشقق في العناصر مسبقة الإجهاد بالعلاقة:

$$M_{cr} = \frac{I_g}{y_b}.f_r + \frac{F_e.I_g}{A_g.y_b} + F_e.e_c \quad (9)$$

F_e- قوة سبق الإجهاد الفعالة،

A_g- المساحة الكلية للمقطع الخرساني،

e_c-لامركـــزية تطبيق قوة سبق الإجهاد في المقطـــع الواقع في منتصف مجاز العنصر بالنسبة إلى مركز ثقل المقطع الخرساني.

بيـــنما في الكود الروسي SNIP [12]، يـــتم تقييم العزم المسبب للتشقق في العناصر الخرسانية المسلحة مسبقة الإجهاد بالعلاقة:

$$M_{cr} = R_{bt,ser}.W_{pl} + P.r + P.e_{op} \quad (10)$$

هنا:

P - قوة سبق الإجهاد الفعالة،

e_{op}- لامركـــزية تطـــبيق قوة سبق الإجهاد بالنســـبة إلى مركـــز ثقـــل مساحة المقطع المكافئ،

r ــ المســـافة بيـــن نقطة النواة المركزية للمقطع الأكثر بعداً عن الألياف الخرسانية المشـــدودة، ومركـــز ثقـــل مساحة المقطع المكافئ.

عـــلماً أن قيمة المعامل (r) تتغير تـــبعاً لحالة الإجهاد والانفعال المتكونة في المقطـــع العرضي، وتحدد قيمتها عند أخذ تأثيـــر سبق الإجهاد في العناصر المعرضة للانحناء، والمعرضة للضغط اللا محوري [12،14] بالعلاقة:

$$r = \varphi(\frac{W_{red}}{A_{red}}) \quad (11)$$

$$0.7 \le \varphi = 1.6 - (\frac{\sigma_b}{R_{b,ser}}) \le 1 \quad (12)$$

حيث:

A_{ps}- عزم مقاومة المقطع المكافئ المرن في منطقة الشد،

A_{red}- مساحة المقطع المكافئ،

φ- معامل يأخذ بالاعتبار الانفعالات اللدنة لخرسانة منطقة الضغط،

σ_b- الإجهادات في الألياف الخارجية لخرسانة منطقة الضغط نتيجة تأثير الأحمال الخارجية، إضافةً إلى قوة سبق الإجهاد المؤثرة، والتي تحسب على اعتبار مادة العنصر مرنة خطية،

$R_{b,ser}$- المقاومة القصوى للخرسانة على الضغط المحددة من اختبار مواشير بأبعاد 150x150x 600mm، على الضغط المحوري بعمر 28 يوماً.

عند مقارنة العلاقتين (9) و (10) نجد أنهما متشابهتان في الإطار العام، فكل منهما يأخذ بالاعتبار تأثير قوة سبق الإجهاد، لكن تحديد أبعاد النواة المركزية يختلف بعض الشيء، حيث الكود الروسي SNIP [12] يحددها باعتبار وجود التسليح في المقطع العرضي، أما الكود الأمريكي [9] فيهمل تأثير وجود التسليح على أبعاد هذه النواة.

في كثير من الحالات، يحصل في خرسانة منطقة الضغط في العناصر الخرسانية المسلحة مسبقة الإجهاد تطور في الانفعالات اللدنة الناتجة عن الزحف، نتيجة مستوى الإجهاد العالي، وذلك في المرحلة التي تسبق تكون الشقوق [13].

وقد تبين أنه لابد من أخذ تأثير الانفعالات اللدنة في خرسانة منطقة الضغط، عند تحديد العزم المسبب للتشقق في المقاطع العمودية على المحور الطولي للعناصر مسبقة الإجهاد، والمعرضة للانحناء، أو الضغط اللامحوري [15، 16]؛لأن هذه الانفعالات تخفض مقاومة الخرسانة المشدودة لتكون الشقوق فيها[13]، وقد يصل هذا الانخفاض إلى حوالي 20%.

تختلف العلاقات التي تحدد قوة سبق الإجهاد في الكود الروسي عنها في الكود الأمريكي؛ فالكود الأمريكي ACI Code [9] يحدد قيمة قوة سبق الإجهاد في العناصر الخرسانية المسلحة مسبقة الإجهاد جزئياً أو كلياً بالعلاقة:

$$F_e = A_{ps}.f_{se} \quad (13)$$

في هذه العلاقة:

A_{ps}- مساحة المقطع العرضي لفولاذ التسليح مسبق الإجهاد والموجود في منطقة الشد فقط.

f_{se}- قيمة الإجهاد المسبق الفعال، مع الأخذ في الاعتبار جميع الضياعات الحاصلة.

بينما الكود الروسي SNIP [12] يحدد قيمة قوة سبق الإجهاد بالعلاقة:

$$P = \sigma_{sp}.A_{sp} + \sigma'_{sp}.A'_{sp} - \sigma_s.A_s - \sigma'_s.A'_s \quad (14)$$

هنا:

$\sigma'_{sp}, \sigma_{sp}$- قيمة الإجهاد المسبق الفعال، مع الأخذ في الاعتبار جميع الضياعات الحاصلة، في فولاذ التسليح المجهد

الموجـــود فـــي منطقة الشد والضغط على التوالي،

σ_{sp}, σ_s- قيمـــة إجهادات الضغط في فولاذ التســـليح غير مسبق الإجهاد الموجود في مـــنطقة الشـــد والضغط على التوالي، من تأثير انكماش وزحف الخرسانة،

A_{sp}, A'_{sp}- مســـاحة المقطع العرضي لفولاذ التسليح المسبق الإجهاد الموجود في منطقة الشد والضغط على التوالي،

A_s, A'_s- مســـاحة المقطـــع العرضي لفولاذ التســـليح غير مسبق الإجهاد الموجود في منطقة الشد والضغط على التوالي.

نلاحـــظ من خلال هاتين العلاقتين لـــتحديد قـــوة ســـبق الإجهـــاد، أن الكود الأمـــريكي يهمـــل تأثير قوة الضغط التي تظهـــر في فولاذ التسليح غير المجهد، من فعـــل انكماش وزحف الخرسانة على قوة ســـبق الإجهـــاد الفعالـــة، كما أنه لا يأخذ بالاعتـــبار وجـــود التسليح مسبق الإجهاد، والذي يستخدم لضمان عدم تشقق خرسانة منطقة الضغط عند تأثير قوة سبق الإجهاد بعد تطبيق الشد.

إن أخذ جميع المؤثرات التي تؤدي إلى تغيير قيمة العزم المسبب للتشقق M_{cr} صعب جداً، لذلك غالباً ما تلجأ المواصفات العالميـــة ومنها الكود الروسي والأمريكي [9,12] إلى اعـــتماد طـــرق تقريبية لتقييم العزم المسبب للتشقق.

مـــن خـــلال نـــتائج تحليل العزم المســـبب للتشـــقق فـــي حالـــة العناصـــر الخرسانية المسلحة المعرضة للانحناء في [16]، والمحسوبة وفق العلاقة (10)، وجد أن اختلافها عن النتائج التجريبية الحاصلة لديه لا تتجاوز 5%.

IV ـ الدراســـة التجريـــبية لتقييم العزم المســـبب للتشقق في العناصر الخرسانية المسلحة المعرضة للانحناء:

يـــبدأ ظهور التشققات في العناصر الخرســـانية عند تجاوز إجهادات الشد في الخرســـانة مقاومتها على الشد، ومن خلال العلاقات المذكورة سابقاً (9)،(10) لتحديد عـــزم تكون الشقوق العمودية على المحور الطولـــي للعنصـــر، نجد أن العزم المسبب للتشقق مؤلف من جزأين أساسيين، أحدهما يتعـــلق بمقاومـــة مـــادة المقطع، والآخر خـــارجي ينتج من تأثير قوة سبق الإجهاد، وعـــند تحديـــد قيمـــة الجـــزء الأول $(R_{bt,ser}.W_{Pl})$ وفـــق الكـــود الروســـي SNIP[12]، الـــذي يـــأخذ بالاعتبار عزم المقاومـــة الـــلدن، نجد أنها أكبر من القيمة $\left(\frac{I_g}{y_b} f_r\right)$ المحـــددة وفـــق الكود الأمريكي ACI Code[9]، الـــذي يســـتخدم عـــزم المقاومـــة المرن. أما بالنسبة للجزء الثاني، فـــإن الكود الروسي [12] يأخذ بالاعتبار تأثيـــر إجهـــادات الضغط في التسليح غير المســـبق الإجهـــاد عـــند تحديد قوة سبق الإجهاد، بينما يهملها الكود الأمريكي [9]، وبالـــتالي تكون قيمة هذا الجزء أصغر في

حالـــة اســـتخدام الكـــود الروسي عن تلك المحددة وفقاً للكود الأمريكي.

فـــي العناصر الخرسانية المسلحة مســـبقة الإجهـــاد، أو ذات الشـــد الجزئي، تكون عزم قوة سبق الإجهاد (الجزء الثاني مـــن معادلـــة تحديد M_{cr}) اكبر بكثير من الجزء الأول المتعلق بمقاومة مادة المقطع؛ لذلك فإن تقييم العزم المسبب للتشقق M_{cr} باســـتخدام الكـــود الأمـــريكي أو الروسي لايختـــلف كـــثيراً لمثل هذه العناصر (أي العناصـــر مســـبقة الإجهـــاد أو ذات الشد الجـــزئي)، لذلـــك تركز اهتمامنا في هذه الدراسة على العناصر الخرسانية المسلحة العاديـــة (الخاليـــة مـــن التســـليح المسبق الإجهاد).

وبهـــدف دراســـة العـــزم المسبب للتشـــقق فـــي العناصر الخرسانية المسلحة العاديـــة المعرضـــة للانحناء، أجرينا عدة تجـــارب في مخابر كلية العلوم الهندسية والتقنية بجامعة سبها في ليبيا، على كمرات خرســـانية مسلحة بتسليح عادي ومعرضة للانحناء.

IV ــ I ــ تحضير عينات الاختبار:

تـــم تحضـــير خلطة خرسانية من رمـــل نـــاعم وركـــام خشـــن مع أسمنت بورتلانـــدي عادي، وفق النسب الموضحة في الجدول (1).

فـــولاذ التســـليح المستخدم في هذا الجـــزء مـــن الـــتجارب من النوع الأملس العادي، وبقطر 12mm للتسليح العامل في منطقة الشد، وقطر 10mm لتسليح الربط، وأســـاور عرضية بقطر 6mm. ويوضح الجدول (2) مواصفات التسليح المستخدمة، والتي حددت تجريبياً.

جدول 1 . نسب المواد الداخلة في تركيب الخلطة الخرسانية

الرمل الناعم Kg/m^3	الركام الخشن Kg/m^3	الأسمنت Kg/m^3	الماء Kg/m^3	الماء / الأسمنت
366	1360	414	203	0.490

جدول 2 .مواصفات التسليح المستخدم.

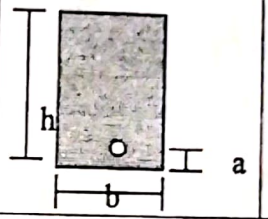
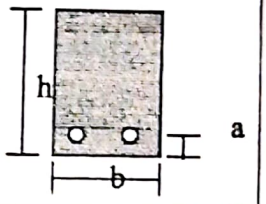
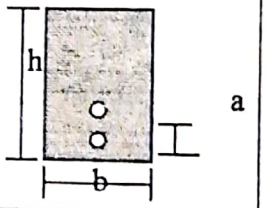
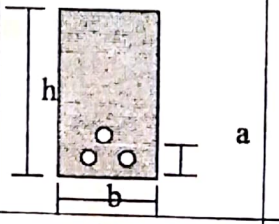
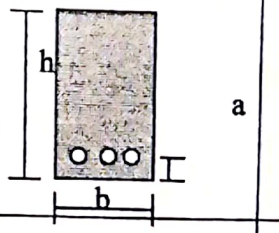
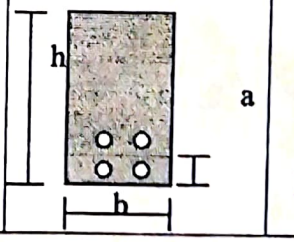
نوع التسليح	القطر mm	حد الخضوع Mpa	حد الانهيار Mpa	معامل المرونة Mpa
أملس عادي	12	381,0	510,6	$2,1 \cdot 10^5$
أملس عادي	10	280,7	392,1	$2,1 \cdot 10^5$

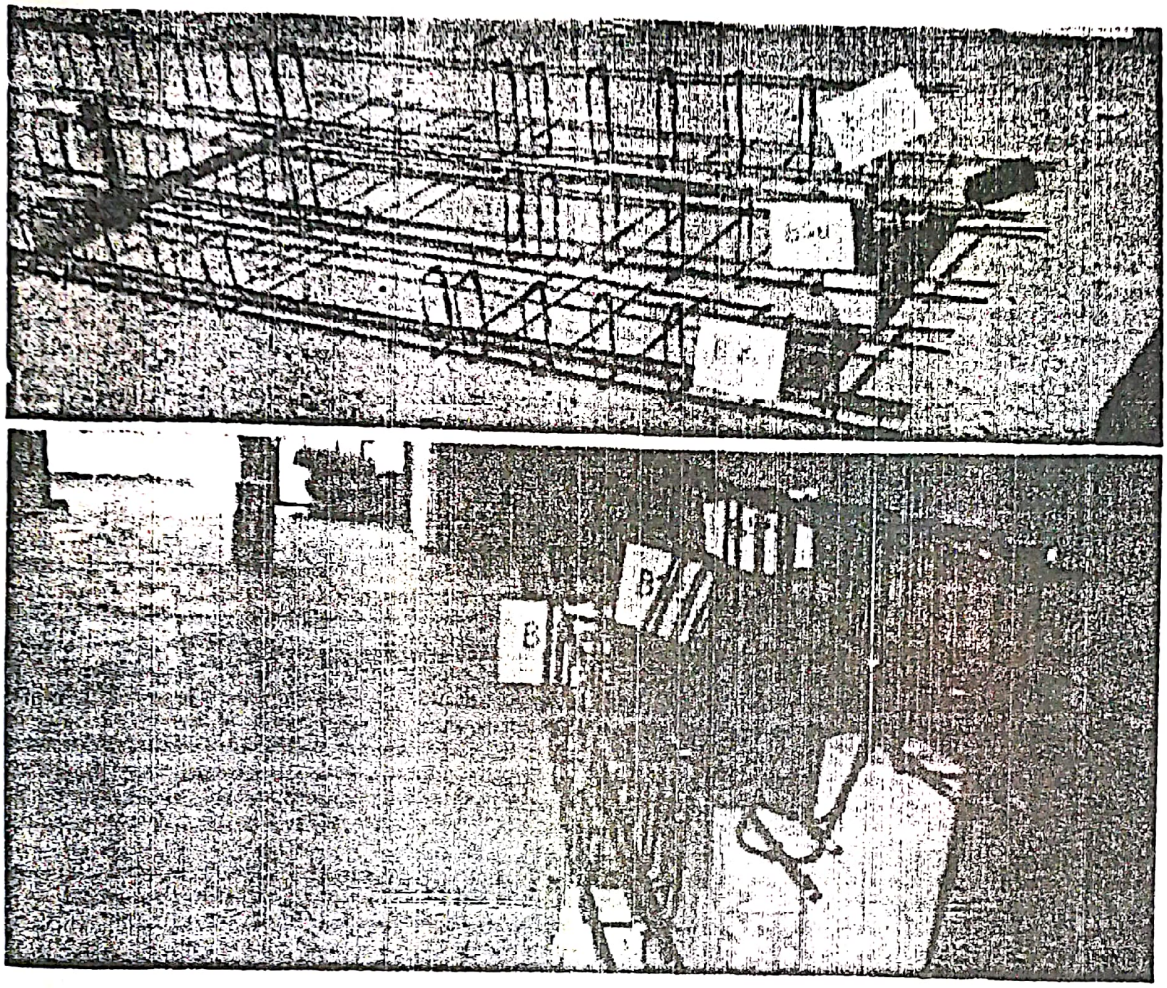
صـــممت جميـــع الكمرات بمقطع ثـــــابت 150×300mm، وبمجـــــاز 2700mm، وتـــم صبها في قوالب معدنية جهـــزت خصيصـــاً لهذه الغاية من صفائح

معدنية بسماكة 5mm، مع تقوية خاصة للجوانب بزوايا معدنية، وبشكل يضمن سهولة الفك والتركيب، وجرى تحضير الخلطة للصب، باستخدام خلاطة آلية تدور حول محور شاقولي وفق نسب الخلط المحددة أعلاه، أما الصب والدمك فقد تمّا يدوياً، وعلى طبقات متلاحقة، مع مراعاة التجانس في الخرسانة، ودرجة الدمك لكل جزء من أجزاء الكمرة، وبهدف تحديد مواصفات الخرسانة المستخدمة على الشد والضغط، تم صب مجموعة مكعبات 100×100×100 mm وأخرى 150×150×150 mm، إضافة إلى مواشر 550×100×100 mm، وحفظ نصف هذه العينات في المخبر بظروف نظامية والنصف الآخر في نفس ظروف حفظ الكمرات المختبرة.

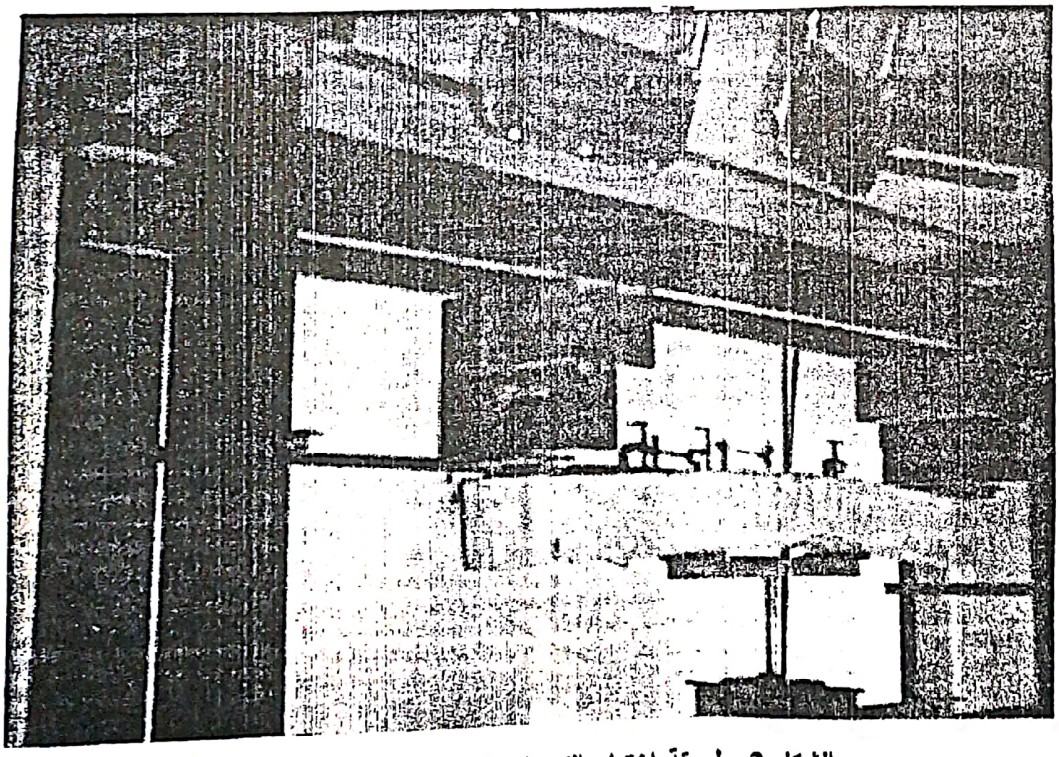
اختلف توزيع التسليح الطولي للكمرات في مقاطعها العرضية، من قضيب واحد إلى أربعة قضبان، وبانتشار متغير ضمن المقطع العرضي من مجموعة إلى أخرى، لأهداف خارجة عن مجال الدراسة الحالية، ويوضح الجدول (3) مواصفات الكمرات المختبرة، كما يوضح الشكل (1) بعض نماذج هياكل التسليح.

جدول 3 . الخواص الهندسية للكمرات المختبرة.

f_{rt} Mpa	f'_c Mpa	E'_c Mpa	E_s Mpa	f_y Mpa	As mm^2	a mm	h mm	b mm	المقطع العرضي	رمـــز العينة
2,87	19,8	$2,25\times10^4$	$2,1\times10^5$	381	113	35	280 300	141 140		BS1 BS2
					226	35	300 300	140 140		BS3 BS4
					226	58,5	300 300	141 141		BS5 BS6
					339	50,67	300 300	141 140		BS7 BS8
					339	35	297 300	142 141		BS9 BS10
					452	58,5	300 295	140 142		BS11 BS12



الشكل 1. نماذج هياكل تسليح الكمرات المختبرة.



الشكل 2. طريقة اختبار الكمرات الخرسانية المسلحة.

IV ــ 2 ــ طريقة الاختبار:

اختبرت جميع العينات بطريقة واحدة، بتطبيق قوتين مركزتين في ثلثي المجاز، عن طريق كمرة معدنية صلبة، تستند على اسطوانتين صلبتين في الموقع المراد تطبيق الحمولة فيه، كما هو موضح في الشكل(2). وبتزايد للحمولة بمعدل 2KN لكل مرحلة تحميل حتى ظهور التشققات، مع التوقف بعد كل مرحلة لمراقبة التشققات بواسطة مكبر يدوي (Optical Micrometer)، وأخذ قراءة أجهزة قياس السهوم الموزعة في عدة مواقع من مجاز الكمرة (وسط المجاز، تحت الأحمال المركزة، قرب المساند)، كما وضعت أجهزة لقياس الهبوط المحتمل في مساند الكمرة.

بعد ظهور التشققات تمت زيادة معدل التحميل لكل مرحلة، فأصبحت حوالي(5KN) وسطياً وأخذت قراءات الأجهزة وعرض التشققات وتباعدها بعد كل مرحلة تحميل. ويوضح الشكل (2) نموذج اختبار الكمرات بعد وصولها إلى مرحلة الانهيار.

IV ــ 3 ــ نتائج الاختبار والمناقشة:

من خلال الاختبارات التي أجريناها، تبين أن ظهور التشققات في الجزء المعرض للانحناء الصافي (بين نقطتي تطبيق القوتين)، كان عمودياً على اتجاه الإجهادات الشادة الرئيسية الناتجة عن العزم الصافي، أما خارج هذه المنطقة، فإن التشققات كانت تبدأ مشابهة لتشققات الانحناء، ولكن مع زيادة الحمولة المؤثرة تصبح إجهادات القص ذات تأثير واضح على اتجاه التشققات الحاصلة في هذه المناطق. وفي جميع الحالات كان ظهور التشققات مفاجئاً. ويوضح الشكل(3) توزع واتجاه التشققات في الكمرات المختبرة.

نلاحظ أن نسبة التسليح الفعلية للكمرات المختبرة، تراوحت ضمن المجال من 0,3% إلى 1,3% $(\mu_s = A_s / bd)$، وبالمقارنة مع النسبة التوازنية $\mu_b = 2{,}34\%$، نجد أن هذه النسب الفعلية أقل من القيم التوازنية، وقد انعكس ذلك على كيفية انهيار هذه الكمرات؛ حيث بدأ الانهيار بسيلان فولاذ التسليح، مما أدى إلى زيادة سرعة اتساع الشقوق، ونقصان ارتفاع المنطقة المضغوطة حتى حصول انهيار هذه المنطقة شكل(3).

بعد تحديد عزم ظهور الشقوق تجريبياً، تم حساب قيمة العزم المسبب للتشقق، وفق كل من الكود الروسي [12] SNIP والكود الأمريكي ACI Code [9] ، وأجريت المقارنة مع القيم التجريبية، فحصلنا على النتائج الموضحة على الجدول (4).

ويظهر واضحاً من الجدول(4)، أن الاختلاف بين القيم التجريبية والحسابية قد

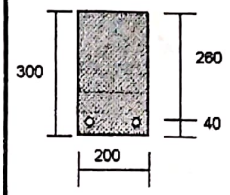
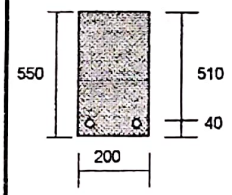
بلغ وسطياً حوالي 55,6٪، وبحد أقصى حوالي 60٪، عند الحساب وفق علاقات الكود الروسي SNIP [12]، أما عند الحساب باعتماد علاقات الكود الأمريكي [9]، فقد بلغ الاختلاف وسطياً مقدار 10,42 % وبحد أقصى 20٪ لبعض الحالات. وفي كلتا الحالتين كانت القيم الحسابية أكبر من التجريبية.

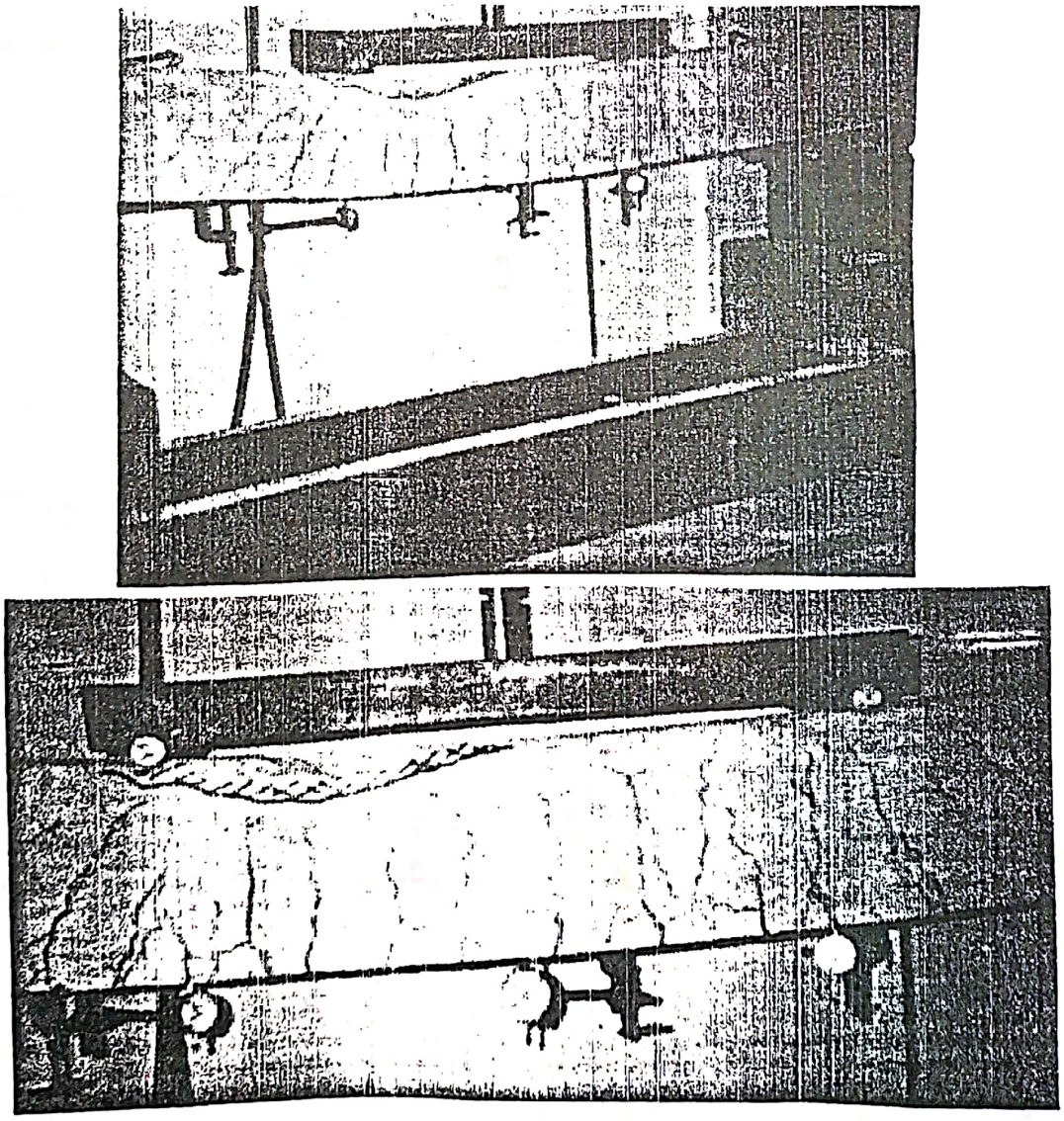
في [17] تم اختبار عناصر خرسانية مسلحة معرضة للانحناء. ويبين الجدول (5) الخواص الهندسية لمقاطعها العرضية، والخواص الميكانيكية للخرسانة وفولاذ التسليح المستخدمين. وقد هدفت الاختبارات في [17]، إلى المقارنة بين سلوك العناصر الخرسانية المسلحة بألياف تسليح بلاستيكية (Fiber Reinforced Plastic) FRP، والعناصر الخرسانية بفولاذ تسليح عادي. ويوضح الجدول (6) نتائج المقارنة بين القيم التجريبية للعزم المسبب للتشقق للعناصر المختبرة في[17] والقيم الحسابية الناتجة باستخدام علاقات الكود الروسي SNIP [12]، والكود الأمريكي ACI Code [9]، والتي من خلالها نلاحظ أن القيم المحسوبة لـ *Mcr* أكبر من القيم التجريبية.

جدول 4. مقارنة النتائج التجريبية لقيم العزم المسبب للتشقق بالقيم الحسابية وفق ACI Code و SNIP (مع إهمال تأثير التسليح في منطقة الضغط)

ACI 318 - 89		SNIP 2.03.01-84		M_{cr}^{exp} kN.M	رمز العينة
$\frac{M_{cr}^{exp}-M_{cr}^{cal}}{M_{cr}^{cl}}$	M_{cr}^{cal} kN.M	$\frac{M_{crc}^{exp}-M_{cr}^{cal}}{M_{crc}^{cl}}$	M_{cr}^{cal} kN.M		
-4,557	5,280	-49,2	9,938	5,048	BS1
-8,63	6,028	-51,3	11,310	5,508	BS2
-20	6,028	-59,9	12,059	4,819	BS3
-19,87	6,028	-59,9	12,059	4,830	BS4
-9,5	6,071	-56,07	11,657	5,120	BS5
-17,8	6,071	-57,3	11,687	4,990	BS6
-6,65	6,071	-54,23	12,381	5,667	BS7
-14,3	6,028	-58,03	12,306	5,165	BS8
-3,97	5,288	-54,90	11,258	5,078	BS9
-9,27	6,071	-57,21	12,873	5,508	BS10
-1,01	6,028	-53,02	12,700	5,967	BS11
-6,14	5,912	-56,7	12,356	5,549	BS12

جدول .5 الخواص الهندسية للعناصر الخرسانية المسلحة المختبرة في [17] .

f_{rt} mpa	f_c' mpa	E_c mpa	E_s mpa	f_y mpa	A_s mm^2	المقطع العرضي للعينة	رمز العينة
3.9	43	$3.3.10^4$	$4.5.10^4$	690	586		ISO1 ISO2
			2.10^5	480	568		ST1 ST2
			$4.5.10^4$	690	586		ISO4 ISO3
			2.10^5	480	586		ST3 ST4



شكل 3. نموذج انهيار الكمرات الخرسانية المسلحة المختبرة

جدول 6 . نتائج حساب العزم المسبب للتشقق وفق ACI ,Code و SNIP والمقارنة بنتائج الاختبار في [17].

SNIP 2.03.01-84		ACI 318 – 89		M_{cr}^{exp} kN.m	رمز العينة	رقم العينة
$\frac{M_{cr}^{exp}-M_{cr}^{cal}}{M_{cr}^{cal}}.100$ %	M_{cr}^{cal} kN. m	$\frac{M_{cr}^{exp}-M_{cr}^{cal}}{M_{cr}^{cal}}.100$ %	M_{cr}^{cal} kN .m			
-59.52	21	-27.97	11.8	8.5	ISO1	1
-49.52	21	-11.02	11.8	10.6	ISO2	2
-64.29	23.8	-27.97	11.8	8.5	ST1	3
-55.5	23.8	-10.17	11.8	10.6	ST2	4
-48.13	71.52	-6.55	39.7	37.1	ISO3	5
-50.22	71.52	-10.33	39.7	35.6	ISO4	6
-51.72	76.85	-6.55	39.7	37.1	ST3	7
-52.37	76.85	-7.81	39.7	36.6	ST4	8

بناءً على نتائج التجارب التي تمت، والمقارنات المذكورة، نجد أن كلاً من الكود الروسي SNIP والأمريكي ACI. Code، يسهلان حساب العزم المسبب للتشقق في العناصر الخرسانية المسلحة المعرضة للانحناء، ولكن التباين الموجود في تقييم الكود الروسي والأمريكي للعزم المسبب للتشقق في هذه العناصر واختلافها عن القيم التجريبية، يحتاج إلى تحليل، ودراسة إضافية.

واستكمالاً لهذه الدراسة، فقد أجرينا مجموعة من الاختبارات الإضافية، بهدف تحليل العوامل المختلفة المؤثرة في تقييم العزم المسبب للتشقق، والتوصل إلى إمكانية تقييم دقيق لقيمة العزم المسبب للتشقق. وسوف نعرض هذه النتائج لاحقاً.

REFERENCES المراجع

1.Raed M .Samra ., "Tim-Dependent Deflection of Reinforced Concrete Beams Revisited ," Journal of Structural Engineering, Vol 123 , No.6, june,1997,pp.823-830.

2.Nilson,A.H., "Design of Prestressed concrete ," Second Edition,1987,pp.357-362.

3.Branson,D.E, and Trost,H., "Application of I-Effective Method in Calculating Deflections of Partially Prestressed Members," *PCI Journal*, V.27,No.5,1982,pp.62-77.

4.Branson,D.E., "Instantaneous and Time-Dependent Deflections of Simple and Continuos Reinforced Concrete Beams, " HPR Report,No.7,Part.1,Alabana Highway Department, Bureau of Puplic Roads, August 1963,pp.1-78.

5.Branson,D.E, and Shaikh,a.f., "Deflection of Partially Prestressed Members," *Special Publication* SP-86: Deflection of concrete structures, American Concrete Institute,Detroit,1985,pp.323-363.

6.Branson, D.E, and Trost, H., "Unified Procedures for Prodicting the Deflection and Centroidal Axis Location of Partially Cracked Non-Prestressed and Prestressed Concrete Members," *ACI Journal*, Proceedings,V.79,No.2,March-April 1982,pp.119-130.

7.Tadros,M.K., "Expedient Service Load Analysis of Cracked Prestressed Concrete Sections," *PCI Journal*,V.27,No.6,Nov-Dec 1983,pp.137-158.

8.Harajli,M.H.,and Alameh,A.S., "Deflection of Progressively Cracking Partially Prestressed Concrete Flxural Members," *PCI Journal*,V.34,No.3,1989,pp.94-128.

9.ACI 318-89. "Building Code Requirements for reinforced Concrete," American Concrete Institute, Detroit,1989.

10.الكـــود العـــربي لتصـــميم وتـــنفيذ المنشآت الخرسانية المسلحة، اتحاد المهندسين العرب، دمشق،1977.

11.الكـــود العـــربي الســـوري لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية المسلحة، نقابة المهندسين، 1992 .

12.SNIP 2.03.01-1984., "Concrete and Reinforced Concrete Structures," *SITP*, Moscow, 1985 (in Russian).

13.Boikov,V.N,Sigalov,E.E., "Reinforced Concrete Structures," stroiizdat, Moscow. 1985. (in Russian).

14.Bandarenka,V.M,and Covarken,D.K., "Reinforced Concrete and Stones Structures," Moscow.1987.(in Russian).

15.Dmitris, S.A., "Limit State of Reinforced Concrete Structures," Stroiizdat, Moscow, 1985. (in Russian).

16. Zalesov, A.S., Kodish, E.N., Lemish, L.L., and Nikitin, I.K., "Strength Cracking Control, and Deformation of Reinforced Concrete," Stroiizdat, Moscow, 1988, P.320 (in Russian).
17. Benmokrane, B., Chaallal,O., and Masmoudi, R., "Flexural Response of Concrete Beams Reinforced with FRP Reinforced Bars," *ACI Structural Journal*, V.93, No.1, 1996, pp.46-55.