

## دراسة تحليلية للسهم طويلة الأمد في الجيزان الخرسانية المسلحة والجيزان المقواة بال FRP

الدكتور محمد غريب\*

ديانا وردة\*\*

(تاريخ الإيداع 10 / 9 / 2014. قُبِلَ للنشر في 28 / 12 / 2014)

### □ ملخص □

انتشر مؤخراً استخدام صفائح الألياف البوليميرية لتقوية الجيزان الخرسانية المسلحة وذلك يعود إلى المقاومة العالية التي تعطيها صفائح التقوية مع العلم بأن وزنها قليل، إضافة إلى سهولة التركيب وقلة تكاليف الصيانة في حال تم مقارنتها مع طرق التدعيم الأخرى كاستخدام الصفائح الفولاذية. كما أثبت التدعيم الخارجي باستعمال صفائح الألياف البوليميرية فعالية كبيرة في تقوية ورفع كفاءة العناصر الخرسانية المسلحة المتضررة. إلا أن دراسة تأثير السلوك الطويل الأمد للعناصر المقواة بال FRP لم تأخذ الحيز الكافي من الدراسة، وذلك بسبب صعوبة التنبؤ الدقيق بالسهم طويلة الأمد وعرض الشقوق وسلوك العناصر المقواة بال FRP.

تم في هذا البحث عرض طريقة للتنبؤ الدقيق بالسهم في أي وقت من مرحلة الاستثمار للمنشآت الخرسانية العادية والعالية المقاومة، وفي أي عمر تحميل للخرسانة وتحت تأثير تشوهات الزحف والانكماش ومشاركة التسليح في منطقة الضغط وذلك بالنسبة للجيزان الخرسانية المسلحة، والجيزان الخرسانية المسلحة المقواة بصفائح ال FRP.

إن التنبؤ الدقيق لتزايد السهم في العناصر الخرسانية المسلحة مع الزمن يتطلب دراسة التحليل اللاخطي للتأثيرات المتعلقة بالزمن، حيث أن هذه الدراسات عادة تستغرق زمناً طويلاً وتتطلب جهداً كبيراً [13-6]، لكن في مرحلة التصميم يمكن الاعتماد على أساليب بسيطة، تأخذ في الاعتبار العوامل الهامة التي تؤثر على تزايد السهم مع الزمن وذلك للوصول إلى تصميم دقيق للمنشآت. ولهذا الغرض تم العمل على تطوير العديد من الأساليب المدرجة في الكودات العالمية والمحلية [14-4-3-2-1] إضافة إلى برمجة العلاقات الخاصة بالزحف والانكماش للوصول إلى طريقة تجمع بين البساطة والدقة وتقدم معلومات قيمة عن تأثير العوامل المختلفة على السهم المتزايدة مع الزمن.

قورنت القيم التحليلية من نتائج الطريقة المقترحة مع قيم نتائج تجارب مخبرية مجرأة سابقاً [9-8] وكذلك مع القيم الناتجة عن الكود الأمريكي [1]. وتبين أن القيم التحليلية توافق النتائج المخبرية بشكل جيد [9-8].

**الكلمات المفتاحية:** الجيزان الخرسانية المسلحة، الجيزان الخرسانية المسلحة المقواة بال FRP، FRP، السهم، الزمن، الزحف، الانكماش، تسليح الضغط .

\* أستاذ - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق - دمشق - سورية.

\*\* مهندسة - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق - دمشق - سورية.

## Analytical Study of the Long-Term Deflection in RC Beams & those strengthened with FRP

Dr. Mohammad Ghareeb\*  
Diana Warde\*\*

(Received 10 / 9 / 2014. Accepted 28 / 12 / 2014)

### □ ABSTRACT □

Fiber reinforced polymer (FRP) plates have gained popularity in the strengthening of reinforced concrete (RC) members due to the high strength to weight ratio, the ease of installation and low maintenance costs compared to other systems such as steel plates. Also, external bonding of fiber reinforced polymer (FRP) plate has been proven to be an effective method to strengthen and damage RC structures. However, not much attention has been given to the long-term behavioral aspects of FRP-strengthened RC members. It is difficult to accurately predict the long-term deflection, crack width and behavior of FRP-strengthened RC members.

This study presents a method for predicting the deflections at any time of the service life of normal and high strength concrete structures, loaded at any age, creep coefficient and shrinkage strain and the participation of the compressive steel for RC beams, and for RC beams strengthened with FRP plates.

The accurate prediction of deflections is a complex problem which requires the use of non-linear and time-dependent analytical methods. These methods are, in general, time consuming and require great effort[6-13]. However, at the design stage, simple but reliable methods which take into account the most important parameters influencing the long-term deflections may be very useful to adequately design the structure. For that purpose, many simplified methods have been developed [1-2-3-4-14]. Equations have been programmed to access the method combines the simplicity and accuracy and provides valuable information about the influence of each parameter on the increasing deflections with time.

The analytical values are compared to the experimental results from some existing papers [8-9], and to the results obtained from ACI code [1]. It is found that the analytical method is in a good agreement with the experimental results from some existing papers [8-9].

**Keywords:** Reinforced Concrete Beams; RC Beams Strengthened with FRP; FRP; Deflections; Time; Creep; Shrinkage; Compressive Reinforcement.

---

\* Professor; Department of Constructional Engineering, Faculty of Civil Engineering; Damascus, Syria.

\*\* Postgraduate student, Department of Constructional Engineering, Faculty of Civil Engineering; Damascus, Syria.

**مقدمة:**

إن السهوم طويلة الأمد (Long-Term deflection) تعتبر أحد المعايير الهامة في تصميم المنشآت الخرسانية في مرحلة الاستثمار. ومن أجل الحفاظ على قيمة هذه السهوم في العناصر الخرسانية المسلحة (RC) ضمن الحدود المقبولة، انتشرت مؤخراً طريقة اللصق الخارجي لصفائح الألياف البوليميرية (Fiber Reinforced Polymer (FRP)) على الجيزان الخرسانية المسلحة وذلك من أجل زيادة صلابة الخرسانة وضبط انفتاح الشقوق كما هو موصى عليه في [2](ACI COMMITTEE 435,2003).

توجد هناك عوامل عديدة تنسب إليها صعوبة تحديد مقدار السهم والتغير في السهم مع مرور الزمن والنتائج عن تأثير التشوهات المتعلقة بالزمن وهي تشوهات الزحف والانكماش (Creep and Shrinkage) [5-7-12]. وأهم هذه العوامل:

١- تأثير التسليح في منطقة الضغط على تطور الزحف ومن ثمَّ على تزايد السهوم مع الزمن. كذلك فإن ظاهرتي الزحف والانكماش في الخرسانة تؤديان إلى زيادة تدريجية في السهوم مع الزمن .  
٢- صعوبة تحديد المرحلة التي تبدأ عندها الخرسانة المسلحة في التشقق، كذلك فإن الرطوبة والحرارة تحت تأثير أحمال التشغيل (Service loads) وظروف المعالجة ونسبة الإجهاد المؤثر إلى المقاومة (سوية الإجهاد) وعمر الخرسانة عند تطبيق الحمل تؤثر كلها في مقدار السهم.

إن لجنة السهوم [2](ACI COMMITTEE 435,2003) ولجنة الزحف والانكماش (ACI COMMITTEE 209,2008) [3] تعطي خطوطاً بيانيةً وصيغاً حسابيةً لتحديد مقدار التزايد في السهوم مع مرور الزمن والذي يمكن أن يكون أكبر مرتين من السهم الأولي أو المباشر (Short-Term Deflection)، ومن ثمَّ قد تتجاوز القيمة الكلية للسهم طويل الأمد الحد المسموح به مما يسيء إلى مظهر المنشأة، وقد يعطي فكرة خاطئة عن سلامة المنشأة وأمانها. تطرح هذه الورقة أسلوباً مبسطاً لحساب مقدار تغيير التشوهات مع الزمن في الجيزان الخرسانية المسلحة المقواة بال FRP . وذلك من أجل الوصول إلى نتائج نظرية أكثر دقة لتعيين السهوم المتزايدة في الجيزان الخرسانية المسلحة المقواة بال FRP مع الزمن، حيث يتم الأخذ بعين الاعتبار أغلب العوامل المؤثرة في تزايد السهوم مع الزمن، وأهمها تأثير تسليح الضغط، وكذلك تأثير تزايد تشوهات الزحف والانكماش تبعاً لأحدث إصدارات الكودات. كما تم تطبيق الأسلوب العددي في الطريقة المقترحة، وقسم الزمن إلى مراحل لتعيين تطور الوضعية الإجهادية باعتبار السلوك الخطي واللاخطي للزحف، ومن ثم تمت مقارنة هذه النتائج مع نتائج تجريبية قام بها باحثون آخرون، وكذلك مع الكود الأمريكي [1](ACI COMMITTEE 318,2008). تم التأكد من الدور الإيجابي لتقوية الجيزان الخرسانية المسلحة بلصق صفائح ال FRP خارجياً في تحسين سلوك الجائر على الانعطاف وللتخفيف من تزايد السهوم مع الزمن.

**أهمية البحث وأهدافه:**

هناك حاجة عالمية متزايدة لصيانة وإعادة تأهيل المنشآت المدنية القائمة الضعيفة أو المتضررة. و من التقنيات المتطورة لتدعيم وتقوية المنشآت الهندسية استخدمت صفائح ال FRP لرفع كفاءة الجيزان الخرسانية المسلحة المتصدعة وزيادة مقاومتها للانهايار، كما أن الدراسات والبحوث في مجال تعيين السهوم في الجيزان الخرسانية المسلحة المقواة بال FRP و المتزايدة مع الزمن والنتيجة عن ظاهرتي الزحف والانكماش تعتبر قليلة [6-7].

يؤدي تزايد السهم إلى شعور الناس بعدم الارتياح إلى السلامة الإنشائية للمنشأة، حيث إن تزايد انفتاح الشقوق يسبب صدأ قضبان التسليح، وتزايد هذا الصدأ في قضبان التسليح يؤدي إلى زيادة حجم التسليح وتصدع طبقة الحماية وسقوطها، ومن ثم حدوث نقص في الصلابة وتزايد متتابع في السهم. كما أن تزايد السهم يؤدي إلى تشوه العناصر الإنشائية غير الحاملة ومن ثم تشوه المظهر المعماري .

من الجدير بالذكر أن لجنة السهم في الكود الأمريكي [2](ACI COMMITTEE 435,2003) أوردت أن الصيغة  $\delta_{LT} = \delta_L + \lambda_t \cdot \delta_{sus}$  تعطي قيمة السهم بدقة % (20-40) من قيمة السهم الحقيقي (الواقعي) 78، وهذا يدل على مدى صعوبة تحديد تزايد السهم مع الزمن، وكذلك فإن حل المعادلات التكاملية لتعيين الوضعية الإجهادية للعناصر الخرسانية المعرضة للإنعطاف مع اعتبار الزحف والانكماش من الأمور المعقدة .

#### الفرضيات الأساسية المعتمدة:

- من أجل التوصل إلى تعيين دقيق لتزايد السهم في الجيزان الخرسانية المسلحة مع الزمن، نفترض ما يأتي:
- المقطع العرضي قد يكون متشققاً أو غير متشقق ومعرضاً لعزم انعطاف صافي.
- المقاطع المستوية قبل التشوه تبقى مستوية بعد التشوه.
- وجود تماسك تام بين الخرسانة وحديد التسليح.
- تعتبر تشوهات الزحف بالنسبة للإجهاد المطبق خطية إذا كانت سوية الإجهاد (نسبة الإجهاد المؤثر إلى

$$\frac{\sigma}{f'_c} \leq 0.4 \text{ ، وتعتبر تشوهات الزحف لخطية إذا كانت سوية الإجهاد } \frac{\sigma}{f'_c} > 0.4 \text{ (المقاومة)}$$

- وجود تماسك تام بين الخرسانة وصفائح ال FRP

#### حساب السهم طويل الأمد (Long-Term Deflection) :

يعين تزايد السهم مع الزمن (Long-Term Deflection) في الجيزان الخرسانية المسلحة المقواة وغير المقواة بال FRP، والنتائج عن تزايد تشوهات الزحف والانكماش وفق الكود الأمريكي (ACI COMMITTEE 318,2008) [1] و (ACI COMMITTEE 435,2003) [2] ووفق الكود العربي السوري [14] بإدخال العامل  $\lambda_t$  في الصيغة الآتية:

$$\delta_{LT} = \delta_L + \lambda_t \cdot \delta_{sus} \quad (1)$$

حيث :

$\delta_L$  السهم الآني الناتج عن الحمولة الحية

$\delta_{sus}$  السهم الآني الناتج عن الحمولة الدائمة (الحمولة الدائمة هي الحمولة الميتة مضافاً إليها ربع الحمولة

الحية)

$\lambda_t$  عامل تزايد السهم مع الزمن والمعتمد لفترة زمنية  $t$

$$\lambda_t = \frac{\xi}{1 + 50\rho'} \quad (2)$$

$\rho'$  نسبة التسليح المضغوط في منتصف الفتحة للجوائز المستمرة أو وحيدة الفتحة وفوق المسند في الجوائز

الظفرية

$\xi$  عامل تأثير الزمن على السهم (عامل الزحف) ويؤخذ مساوياً :

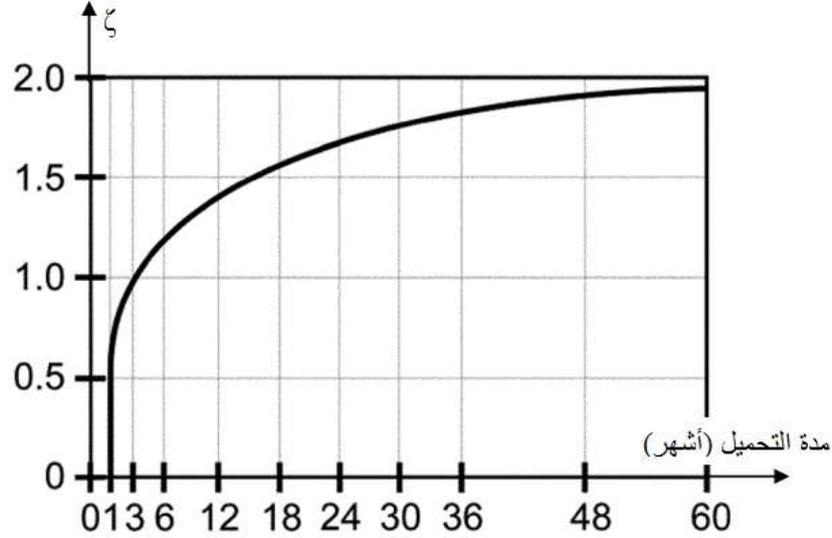
2 للتحميل لمدة 5 سنوات أو أكثر

1.4 للتحميل لمدة 1 سنة

1.2 للتحميل لمدة 6 أشهر

1 للتحميل لمدة 3 أشهر

ويمكن اعتماد الشكل (1) لتعيين قيمة  $\zeta$  لفترة زمنية تقل عن خمس سنوات



الشكل (1) قيمة  $\zeta$  حسب الكود الأمريكي (ACI COMMITTEE 318,2008) والكود العربي السوري

ويمكن تقدير قيم الانكماش في المنشآت الخرسانية المسلحة ووفق الكود العربي السوري [14] باستخدام العلاقات التجريبية الآتية:

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sho} k_b k_d k_p k_t \quad (3)$$

حيث :

$\varepsilon_{sho}$  قيمة الانكماش الاساسية

$k_b$  معامل يتعلق بعيار الاسمنت ونسبة الماء إلى الإسمنت

$k_d$  معامل يتعلق بالأبعاد الهندسية للعنصر الخرساني المدروس وخاصة سمك العنصر  $d_m$

$k_p$  معامل يتعلق بنسبة التسليح الطولي

$k_t$  معامل يتعلق بعمر المنشأة وأبعادها الهندسية

إن المعاملات المختلفة السابق ذكرها تؤخذ من منحنيات تجريبية مذكورة في الملحق (1)

إن طريقة تعيين تزايد السهوم مع الزمن باستخدام المنحنيات البيانية هي طريقة غير قابلة للبرمجة، ومن أجل تعيين تزايد تشوهات الزحف والانكماش بطريقة أدق والتي تأخذ بعين الاعتبار مواصفات المادة الحقيقية (كمية الاسمنت، نسبة الماء إلى الاسمنت، نوع الاسمنت، نوع الحصى، المحتوى الهوائي، أبعاد العنصر، عمر الخرسانة عند التحميل، الرطوبة النسبية، وغيرها) يقترح اعتماد معطيات أحد النماذج الآتية : (CEB MC90 Model , GL2000 Model , ACI209 Model , B3 Model) [3-4]

تم برمجة العلاقات الموجودة في هذه الكودات لتكون برامج فرعية ضمن البرنامج الحاسوبي الذي يقوم بحساب تزايد السهم في الجيزان الخرسانية المسلحة مع الزمن أخذاً بعين الاعتبار تزايد تشوهات الزحف والانكماش، وكذلك تأثير نسبة التسليح المضغوط.

### تطور الوضعية الإجهادية للعناصر الخرسانية المسلحة المعرضة للإنعطاف مع الزمن:

إن تعيين تطور الإجهادات في الفولاذ والخرسانة مع الزمن في الجيزان الخرسانية المسلحة نتيجة الزحف والانكماش يؤول إلى حل مجموعة معادلات تكاملية تعبر عن تساوي التشوهات في الفولاذ والخرسانة في كل لحظة زمنية مع اعتبار تشوهات الزحف والانكماش، وإلى مجموعة معادلات توازن القوى الداخلية في الخرسانة والفولاذ مع القوى الخارجية المطبقة.

$$E_c \left[ \frac{\sigma_c}{E_c} \right] + \left[ \frac{f(\sigma_c)\phi_t}{E_c} \right] + \int_0^t \left\{ \frac{d\sigma_c(t_0)}{dt_0} \cdot \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{df[\sigma_c(t_0)]}{dt_0} \cdot \frac{\phi_t - \phi_{t_0}}{E_c} \right\} dt_0 = \frac{\sigma_s(t)}{E_s} \quad (4)$$

عامل مرونة الخرسانة

$E_s$  عامل مرونة الفولاذ

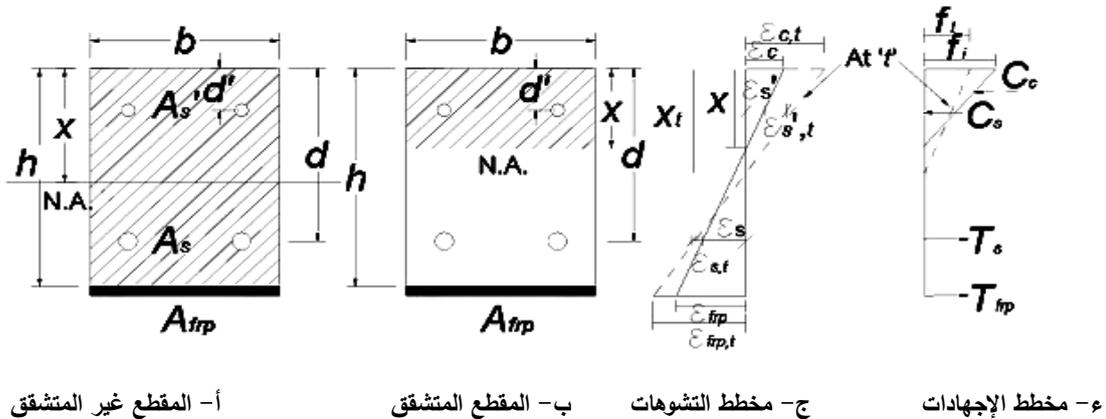
$\sigma_s(t)$  الإجهادات في الفولاذ في اللحظة  $t$

$\sigma_c(t)$  الإجهادات في الخرسانة في اللحظة  $t$

$\phi_t$  معامل الزحف الخطي في الزمن  $t$

$\phi_{t_0}$  معامل الزحف الخطي في الزمن  $t_0$  لكل حمولة

إن الكود العربي السوري لم يشمل تأثير ال FRP في حساب السهم في الجيزان الخرسانية المسلحة المقواة خارجياً بهذا النوع من الصفائح، ولم تعرف تشوهات هذه المادة وتأثيرها على العنصر الإنشائي في حال التدعيم بها. ومن هنا وجب دراسة الوضعية الإجهادية للجائز الخرساني المقوى بال FRP كما يأتي :



أ- المقطع غير المتشق

ب- المقطع المتشق

ج- مخطط التشوهات

د- مخطط الإجهادات

الشكل (2) المقطع الخرساني قبل وبعد التشقق

حيث :

ارتفاع المقطع	$h$	عرض المقطع	$b$
مساحة التسليح المضغوط	$A_s'$	مساحة التسليح المشدود	$A_s$

$$C_c = \frac{1}{2} f_i b x = \frac{1}{2} \varepsilon_c E_c b x$$

$$C_s = \varepsilon'_s E_s A_s' \quad (5)$$

$$T_s = \varepsilon_s E_s A_s$$

$$T_{frp} = \varepsilon_{frp} E_{frp} b_{frp} t_{frp}$$

قوة الضغط في الخرسانة	$C_c$	قوة الضغط في الفولاذ المشدود	$T_s$
قوة الضغط في الفولاذ المضغوط	$C_s$	قوة الشد في صفيحة الـ FRP	$T_{frp}$
اجهاد الليف العلوي في الخرسانة المضغوطة	$f_i$	التشوه في صفيحة الـ FRP	$\varepsilon_{frp}$
تشوه الليف العلوي في الخرسانة	$\varepsilon_c$	تشوه قضبان التسليح المضغوطة	$\varepsilon'_s$
تشوه قضبان التسليح المشدودة	$\varepsilon_s$	التشوه الأقصى في صفيحة الـ FRP	$\varepsilon_{frp.u}$

تتعلق التشوهات في قضبان التسليح المضغوط وقضبان التسليح المشدود و في صفيحة الـ FRP بتشوهات

الخرسانة كالآتي :

$$\varepsilon'_s = \frac{x - d'}{x} \varepsilon_c \leq \frac{f'_y}{E_s}$$

$$\varepsilon_s = \frac{d - x}{x} \varepsilon_c \leq \frac{f_y}{E_s} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{frp} = \frac{h - x}{x} \varepsilon_c \leq 0.8 \varepsilon_{frp.u}$$

حد الخضوع لقضبان التسليح المضغوطة	$f'_y$	حد الخضوع لقضبان التسليح المشدودة	$f_y$
التشوه الأقصى في صفيحة الـ FRP	$\varepsilon_{frp.u}$	بعد المحور المحايد	$x$
بعد مساحة التسليح المشدود	$d$	بعد مساحة التسليح المضغوط	$d'$

إن التشوه الأقصى في صفيحة الـ FRP مضروب بعامل 0.8 لإدخال تأثير تشوهات انزلاق صفيحة الـ FRP الملصقة على الجيزان (Bonacci and Maalej, 2001) [10].

الطريقة التحليلية لحساب تزايد السهوم في الجيزان الخرسانية المسلحة وتلك المقواة بالـ FRP والمعرضة للانعطاف مع الزمن (الأسلوب المقترح)

إن حل المعادلات (4) و(5) و(6) يفضل أن يتم وفق طريقة عددية وذلك بتقسيم الزمن إلى مراحل صغيرة تثبت فيها الوضعية الإجهادية، وتقاس خلالها تشوهات الخرسانة، والتي تعتبر في نهايتها تشوهات قسرية تطبق على العنصر. ويتم ذلك كما يأتي :

- 1- إدخال شكل المقطع العرضي ويمكن اعتماد مجموعة من النماذج للمقاطع العرضية المعروفة (مستطيل، مقطع ا، مقطع T، مقطع صندوقي، غيرها من الأشكال)
- 2- إدخال أبعاد المقطع العرضي
- 3- إدخال كمية التسليح المشدود  $A_s$  والمضغوط  $A_s'$  ومواقعهما  $d, d'$  وعامل مرونة الفولاذ المستخدم  $E_s$

4- إدخال مواصفات الخرسانة  $f_c$  ، وعامل مرونة الخرسانة  $E_c$  عمر الخرسانة عند التحميل  $t_0$

5- إدخال مواصفات الـ FRP مساحتها  $A_{frp}$  وعامل مرونتها  $E_{frp}$

6- إدخال القوى المطبقة M و N

7- إدخال المواصفات والعوامل التي تتعلق بنماذج التنبؤ بالزحف والانكماش حسب النماذج الأربعة

[3-4] (كمية الإسمنت، نسبة الماء إلى الإسمنت، نوع الإسمنت، نوع الحصويات، المحتوى الهوائي، أبعاد

العنصر، عمر الخرسانة عند التحميل، الرطوبة النسبية، وغيرها)

8- حساب الخواص الهندسية للمقطع العرضي

9- حساب الإجهادات النازمية في المقطع العرضي، في حال وجود إجهادات شد تزيد عن مقاومة الخرسانة

المستخدمة للشد حيث يعتبر المقطع متشققاً يعاد حساب الخواص الهندسية للمقطع العرضي وتعين الإجهادات في

المقطع العرضي المار من الشق

10- تعيين تشوهات الزحف والانكماش في كل مرحلة زمنية  $\Delta t$  وكمجموع للتشوهات السابقة وباعتبار القوى

الداخلية ثابتة في كل المرحلة

$$\varepsilon_{cr} = \sum \frac{\varphi(t, t_0)}{E(t)} \Delta \sigma_{\tau i} \quad (7) \quad \text{في حالة الزحف الخطي :}$$

$$\varepsilon_{cr} = \sum \frac{\varphi(t, t_0)}{E(t)} \cdot \Delta f(\Delta \sigma_{\tau i}) \quad (8) \quad \text{في حالة الزحف اللاخطي :}$$

تشوهات الزحف في الـ FRP تحسب من العلاقة وفق [11] (Holmes and Just, 1983) :

$$\varepsilon_{frp,t} = \varepsilon_{frp} \left( \frac{t}{t_0} \right)^m \quad (9)$$

حيث :

عمر الخرسانة بالساعة بعد تطبيق الحمولة 1 ساعة

$$\text{ميل لخط } \log \left( \frac{t}{t_0} \right)$$

حيث إن عامل تشوهات زحف الـ FRP  $\phi_{frp}$  يحسب من العلاقة الآتية

$$\phi_{frp} = \left( \frac{t}{t_0} \right)^m - 1 \quad (10)$$

تحسب التشوهات الكلية في العنصر بمرحلة معينة كمجموع لتشوهات الزحف والتشوهات الآتية المرنة إضافة

إلى التشوهات الناتجة عن الإنكماش:

$$\Delta \varepsilon(t) = \sum \frac{\sigma}{E(t)} + \sum \frac{\varphi(t, t_0)}{E(t)} \cdot \Delta \sigma_{\tau i} + \sum \varepsilon_{frp,t}(t) + \varepsilon_{sh}(t) \quad (11)$$

## 11- تطبيق تشوهات الزحف والإنكماش كتشوهات قسرية على المقطع

-في حال زيادة الإجهاد الناظمي في المقطع العرضي المدروس عن  $0.4f'_c$  فإن تشوهات الزحف اللاخطية تعين مع اعتماد الكود الأوربي [4] (CEB,90-99)

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_o \cdot \exp \left[ 1.5 \left( \frac{\sigma}{f'_c} - 0.4 \right) \right] \quad (12)$$

-في حال وجود تشوهات زحف لاخطية فإن هذه التشوهات القسرية تؤول إلى توزع لاخطي للإجهادات في المقطع العرضي، وتعين أولاً قوة التثبيت  $N_{fix}$  وعزم التثبيت  $M_{fix}$  الناتج عن التشوهات القسرية. ومن ثم نعين تزايد الإجهادات الإضافية في الخرسانة والفولاذ والنتيجة عن الزحف والإنكماش في المرحلة الزمنية المدروسة -يتم التأكد من أن تزايد القوى الداخلية في فولاذ التسليح والقوى الناتجة عن الزحف والإنكماش متوازنة -نحسب تزايد الإجهادات في قضبان التسليح المضغوط وتناقصها في الخرسانة في المقطع العرضي المدروس في نهاية  $\Delta t$

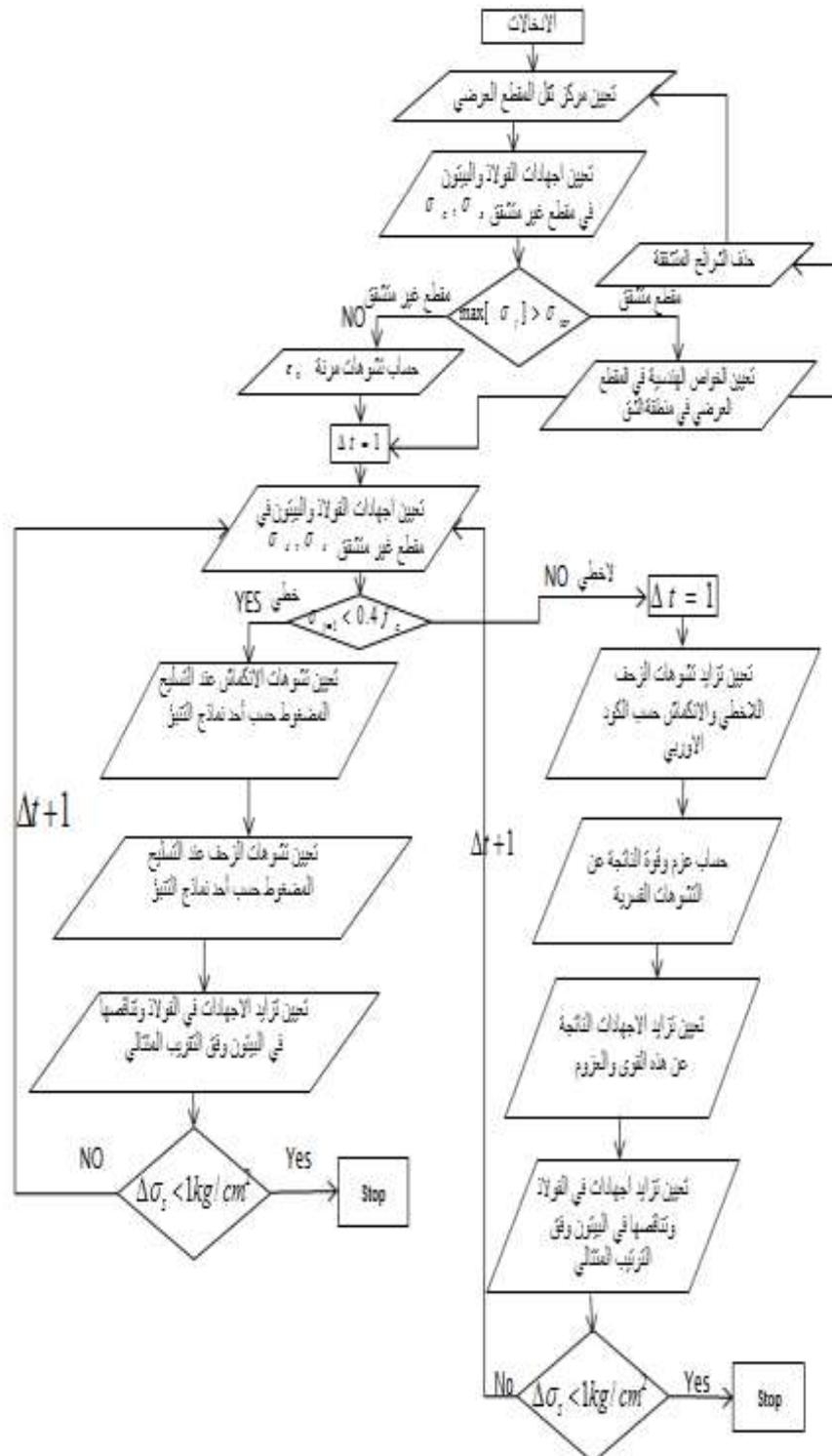
-يتم الانتقال إلى مرحلة زمنية جديدة  $\Delta t_i$

-يتوقف البرنامج وتطبع النتائج في إحدى الحالات الآتية :

- 1- زيادة تشوهات في المرحلة  $\Delta t$  متناهية في الصغر وكذلك فإن تغير الإجهادات صغير جداً وهذا يعني تخامد تشوهات الزحف دون انهيار في العنصر (في المنطقة المضغوطة)
- 2- تزايد الإجهادات في الفولاذ حتى حد الخضوع في الفولاذ المستخدم  $f_y = 2100 \text{ kg/cm}^2$  للفولاذ الأملس و  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$  للفولاذ المحلزن ( في المقطع المضغوط)

وبين الشكل (3) مخططاً تدفقياً يوضح سير العمل من أجل الحساب الدقيق لتزايد السهوم في الجيزان الخرسانية المسلحة مع الزمن.

الإدخالات :
- شكل المقطع العرضي
- أبعاد المقطع العرضي
- مساحة التسليح المشدود والمضغوط
- عامل مرونة الفولاذ المستخدم
- عامل مرونة الخرسانة
- عمر الخرسانة عند التحميل
- مساحة ال-FRP
- عامل مرونة ال-FRP
- القوى المطبقة
- كمية الإسمنت، نسبة الماء إلى الإسمنت، نوع الإسمنت، نوع الحصى، المحتوى الهوائي، أبعاد العنصر، الرطوبة النسبية.



الشكل (3) مخطط تدفقي لحساب تزايد السهم في الجيزان الخرسانية المسلحة مع الزمن

### تطبيق عددي:

ندرس نظرياً ووفق الطريقة المقترحة في المخطط التدفقي السابق تزايد السهوم في الجانز الخرساني المسلح المبين والمدروس تجريبياً [8] حيث:

$$B = 10\text{ cm}, H = 20\text{ cm}$$

$$A'_s = 1\phi 8, A_s = 1T18, a' = a = 1\text{ cm}$$

أبعاد المقطع العرضي  
قيمة التسليح المضغوط والمشدود و

التغطية

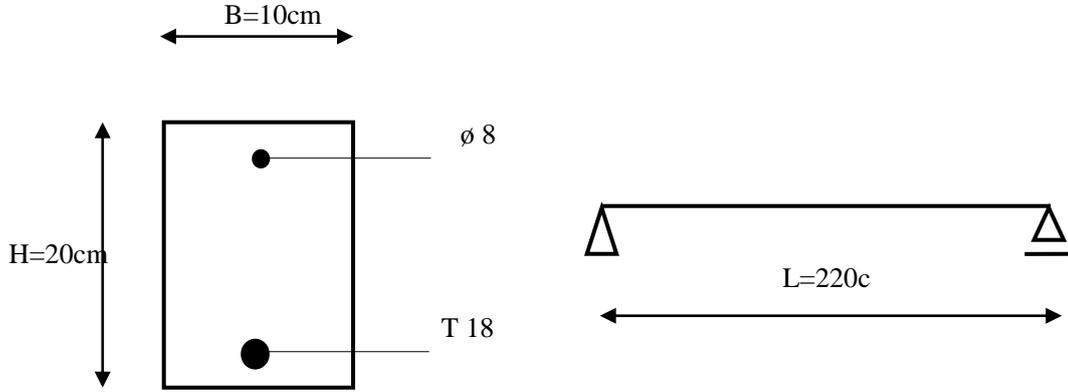
$$f'_c = 200\text{ kg/cm}^2, E_c = 2.10^5\text{ kg/cm}^2, n = 10$$

$$L = 220\text{ cm}$$

$$t_0 = 28\text{ days}$$

$$M = 4.8\text{ t.m}$$

مواصفات المواد  
فتحة الجانز  
عمر الخرسانة عند التحميل  
عزم انعطاف دائم



الشكل (4) الجانز المدروس ومقطع عرضي فيه

في البداية تم تعيين عامل الزحف لوحددة الإجهاد  $J(t, t_0)$  وتشوه الانكماش  $\varepsilon_{sh}(t, t_0, t_s)$  مع الزمن باستخدام النماذج الآتية المبرمجة حاسوبياً: (CEB MC90 Model, GL2000 Model, ACI209 Model, B3) [3-4] (Model

كما أجريت مقارنة لهذه النتائج، وبين الشكل (5) والشكل (6) الفروقات بين هذه النماذج في تحديد قيم تشوهات الانكماش و الزحف مع الزمن. حيث نعلم أن:

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_c} [n(t_0) + \varphi(t, t_0)]$$

$$E_c(t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{\varepsilon_{ci}(t_0)} \quad (13)$$

$$n(t_0) = E_c / E_c(t_0)$$

$t$  عمر الخرسانة لحظة الحساب

$t_0$  عمر الخرسانة عند التحميل

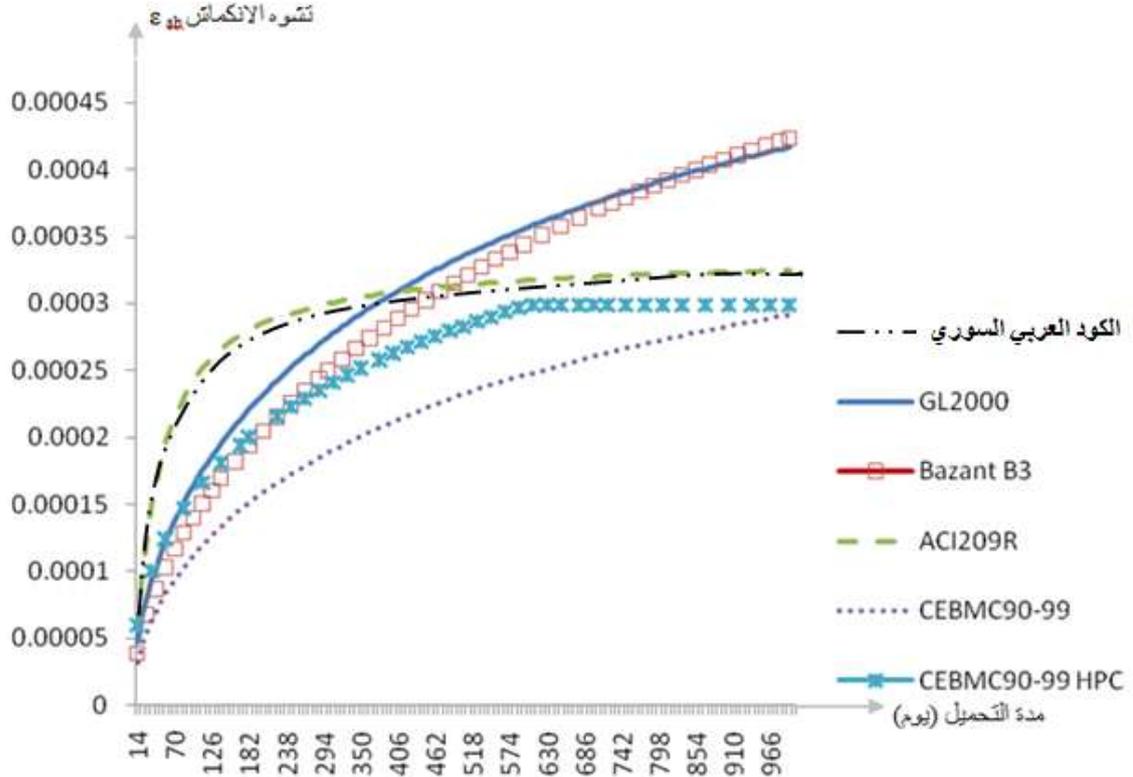
$t_s$  عمر الخرسانة عند بداية التجفيف

$\varphi(t, t_0)$  عامل الزحف للخرسانة

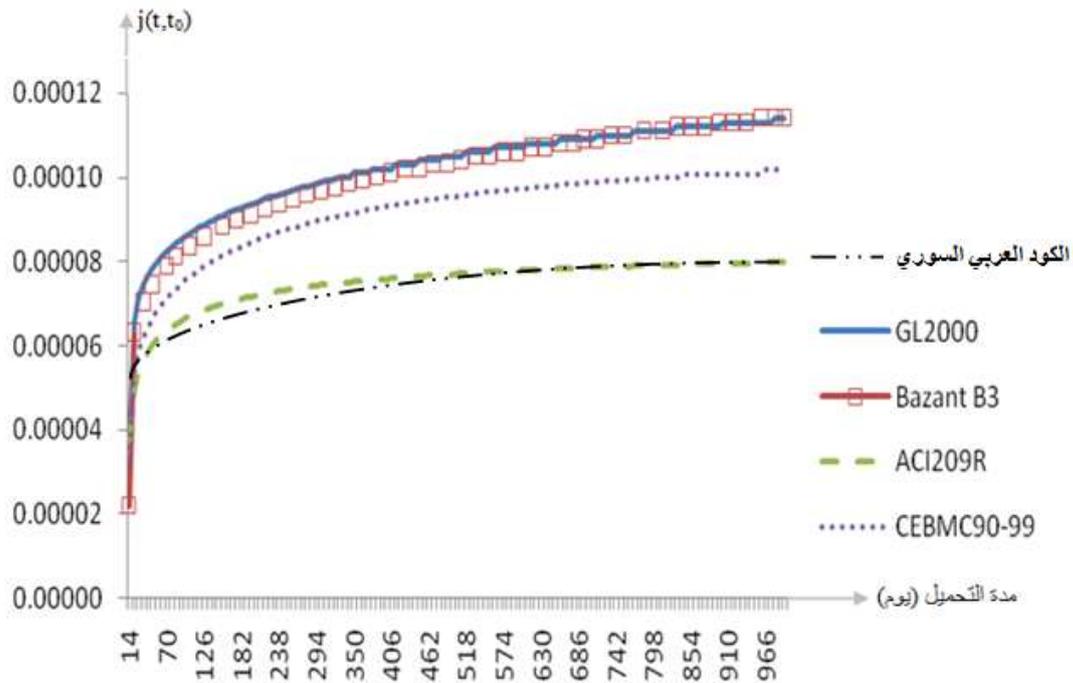
$\sigma_c(t_0)$  الإجهاد المطبق وقت التحميل

$\varepsilon_{ci}(t_0)$  التشوه الأولي

(المرن)



الشكل (5) مقارنة لنماذج تقدير الانكماش وفق [4-3]



الشكل (6) مقارنة لنماذج عامل الزحف لوحدة الإجهاد وفق [3-4]

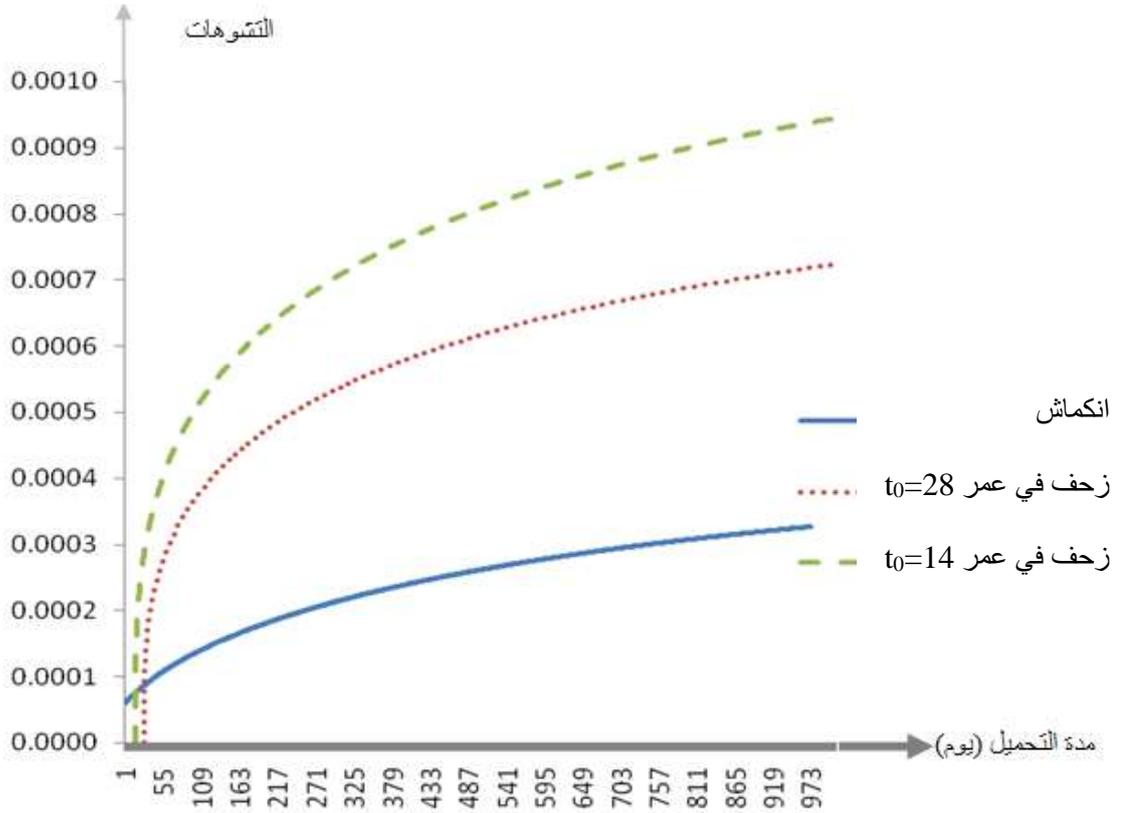
ولحل التطبيق تم اختيار الكود الأوربي [4] (CEB,90-99) لحساب تزايد التشوهات المتعلقة بالزمن من زحف وانكماش، ويبين الشكل (7) تشوهات الزحف مع اختلاف عمر التحميل للخرسانة وتشوهات الانكماش للإدخالات الآتية:

- $t_s = 1$  عمر الخرسانة عند بداية التجفيف
- $N, R$  نوع الاسمنت : عادي أو سريع التصلب
- $RH = 70\%$  الرطوبة النسبية
- $f'_c = 200 \text{ kg/cm}^2, E_c = 2.10^5 \text{ kg/cm}^2, n = 10$  مواصفات الخرسانة
- $H = 20 \text{ cm}$  ارتفاع المقطع

حيث اعتمد التطبيق العددي المدروس وحسب العلاقات الموجودة في الكود الأوربي [4] (CEB,90-99) كان تابع تشوهات الانكماش (13) وتابع معامل الزحف (14):

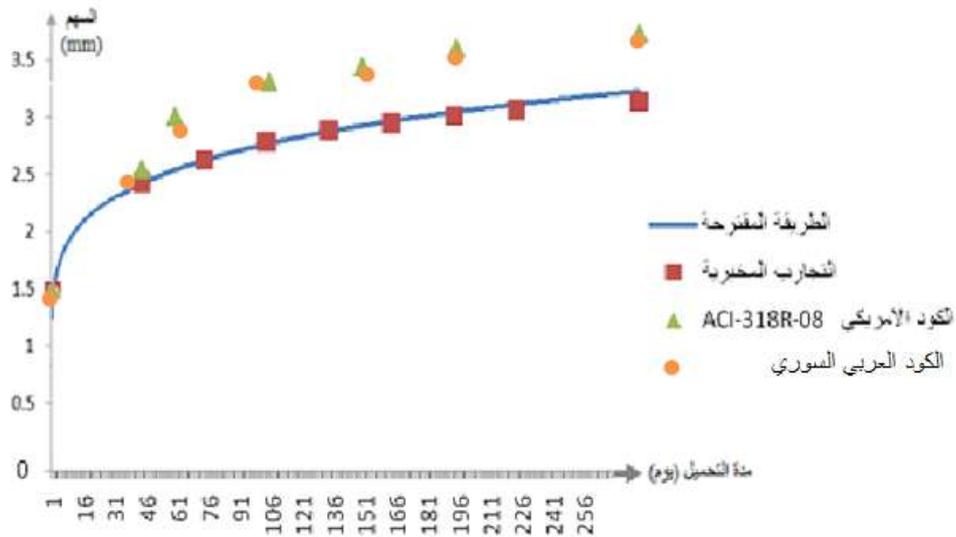
$$\varepsilon_{sh} = 700.10^{-6} \left[ \frac{f'_c/100}{6 + f'_c/100} \right]^{2.5} \cdot (1 - e^{-0.2\sqrt{t}}) - 671.88.10^{-6} \left[ \frac{t - t_s}{1400 + t - t_s} \right] e^{-0.11.f'_c/100} \quad (14)$$

$$\varphi(t, t_0) = 8.7207 * \left( \frac{1}{0.1 + t^{0.2}} \right) \cdot \left( \frac{t - t_0}{1984.35 + t - t_0} \right)^{0.3} \quad (15)$$



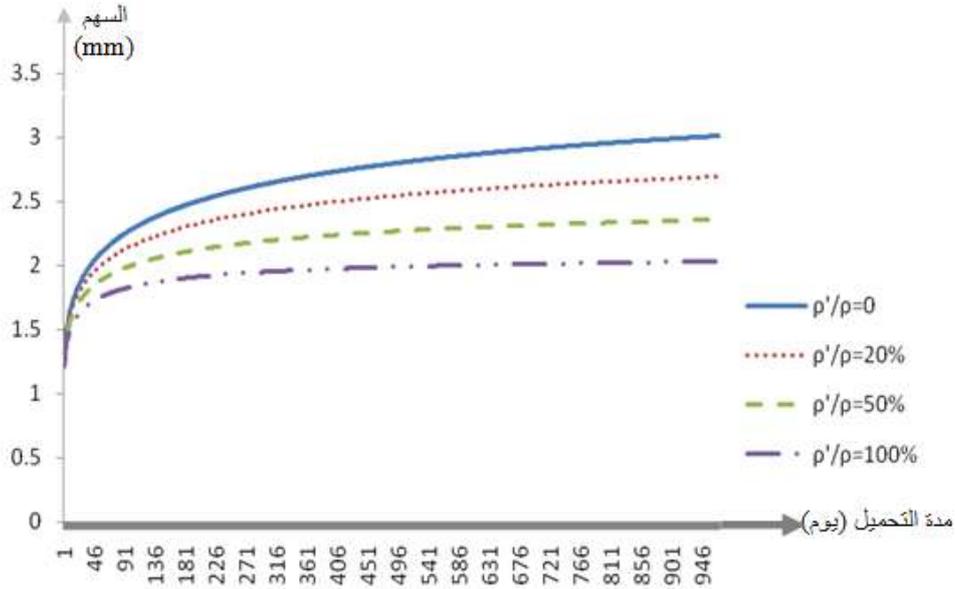
الشكل (7) تشوهات الزحف باختلاف عمر التحميل وتشوهات الانكماش حسب الكود الأوربي [4]

تم الحساب باستخدام التحليل المقترح في هذه الورقة وطريقة الحساب خطوة بخطوة (Step-by-Step) المبينة في المخطط التدفقي السابق والمعتمدة على الكود الأوربي [4] (CEB,90-99) لحساب تزايد التشوهات المتعلقة بالزمن من زحف وانكماش. يلاحظ من خلال النتائج المبينة في الشكل (8) مدى التطابق في النتائج بين الطريقة المقترحة في التطبيق العددي ونتائج تجارب مخبرية لنفس الجائز وبنفس الأبعاد [8]. كما يلاحظ الفرق الكبير بين النتيجة التي يعطيها البرنامج في التطبيق العددي وقيم الكود الأميركي [1] (ACI COMMITTEE 318,2008) البسيطة حيث أنه مع تزايد الزمن يكون السهم الحقيقي في اليوم 270 أصغر من السهم المحسوب حسب الكود الأميركي بـ 20%.



الشكل (8) مقارنة لتزايد السهوم مع الزمن بين الطريقة المقترحة والكود الأمريكي (ACI COMMITTEE 318,2008) [1] والكود العربي السوري [14] ونتائج مخبرية [8]

إن تأثير فولاذ التسليح المضغوط يبدو واضحاً في الشكل (9) حيث إن زيادة كمية التسليح المضغوط تؤدي إلى تناقص إجهادات الضغط في الخرسانة بالرغم من ظهور الشقوق على طول المقطع وتزايد الإجهادات في الفولاذ مع الزمن، ومن ثم فإن زيادة التسليح المضغوط يخفف من تزايد السهوم مع الزمن.

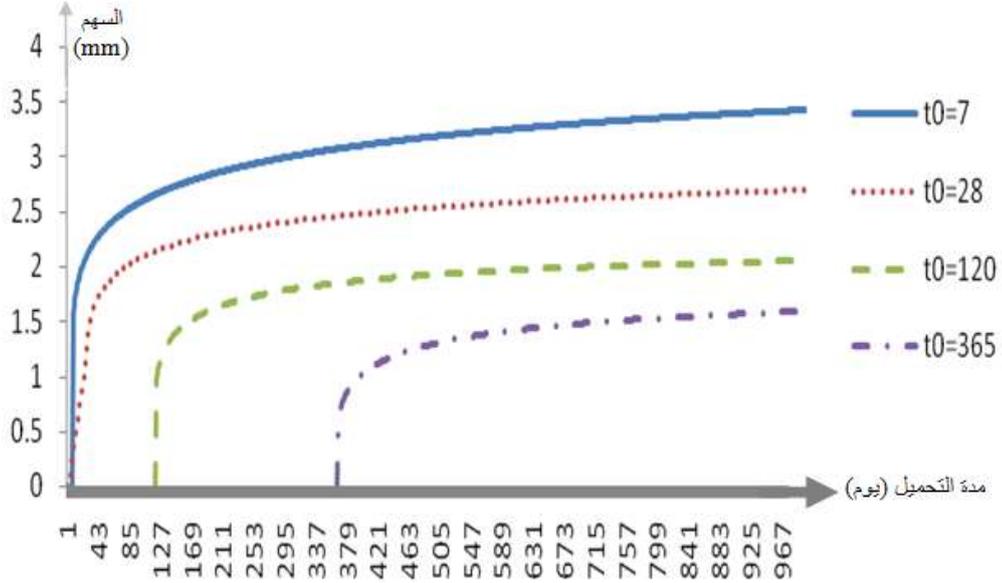


الشكل (9) تزايد السهوم مع الزمن باختلاف نسبة التسليح المضغوط

$\rho$  نسبة التسليح المشدود

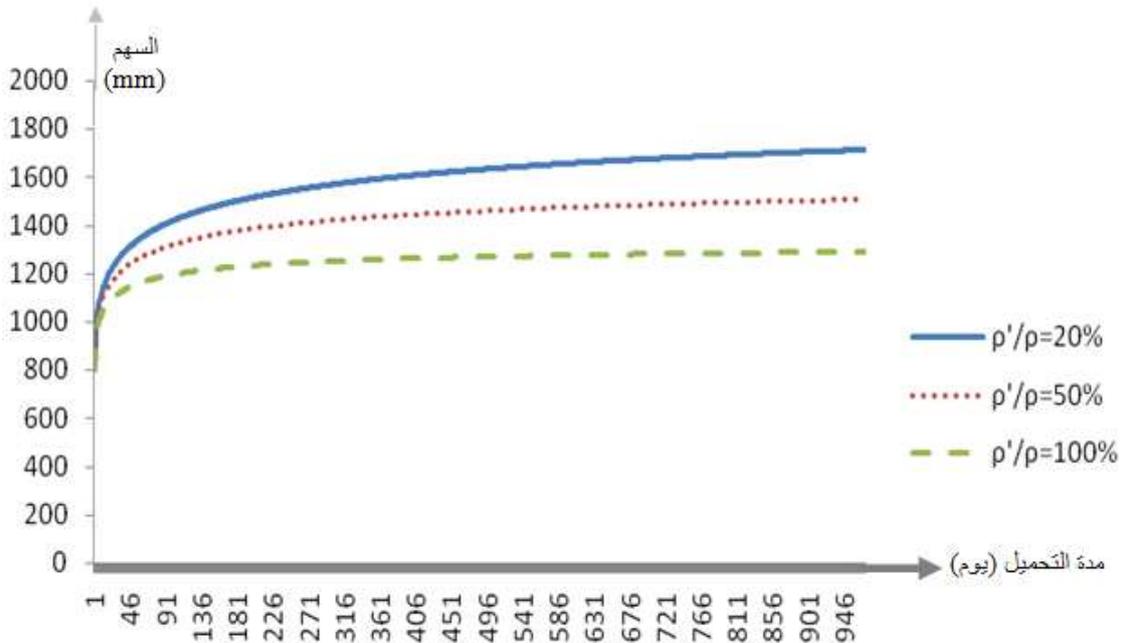
$\rho'$  نسبة التسليح المضغوط

كما أن لعمر الخرسانة عند التحميل أهمية كبيرة وتأثيراً كبيراً على قيم تزايد السهم مع الزمن وإن هذا العامل غير مأخوذ بعين الاعتبار في الكود الأمريكي (ACI COMMITTEE 318,2008) ، حيث نلاحظ في الشكل (10) التحميل المبكر بعمر 7 أيام إلى زيادة في السهم بمقدار 27% مقارنة مع التحميل بعمر 28 يوم.



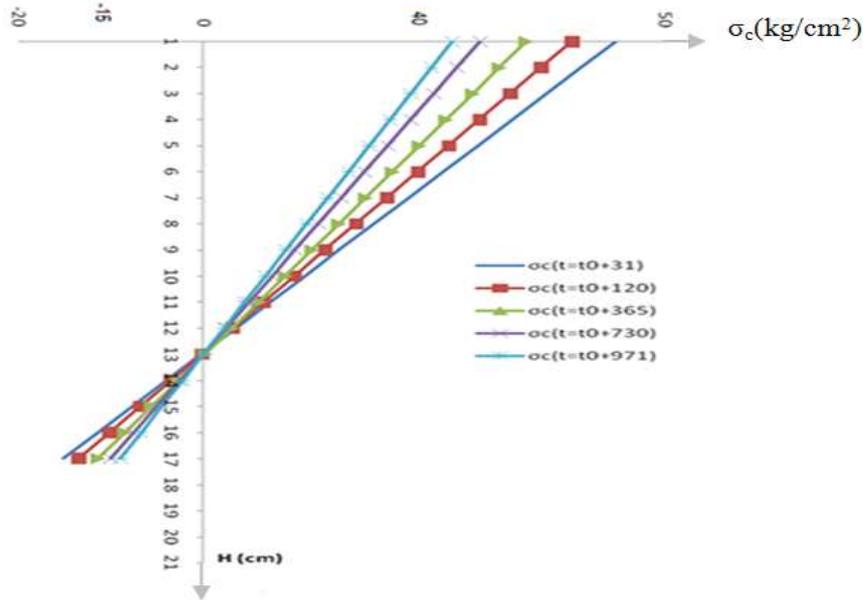
الشكل (10) تزايد السهم مع الزمن باختلاف عمر الخرسانة عند التحميل

تترافق زيادة كمية التسليح المضغوط بنقصان في تغيير الإجهادات عند منسوب التسليح المضغوط بمقدار يقارب 33% في حال كانت زيادة نسبة التسليح المضغوط في الجائر من  $\rho' = 0.2\rho$  إلى  $\rho' = \rho$  ، حيث يوضح الشكل (11) هذا التناقص في الإجهادات مع تزايد كمية التسليح المضغوط.



الشكل (11) تزايد إجهادات عند منسوب التسليح المضغوط

ويبين الشكل (12) تناقص إجهادات الضغط في الخرسانة بالرغم من وجود الشقوق نتيجة الزحف ومشاركة التسليح في المنطقة المضغوطة. ونلاحظ أن التطبيق العددي المدروس يحوي على إجهادات شد تزيد عن مقاومة الخرسانة المستخدمة للشد يعتبر المقطع المنشقق

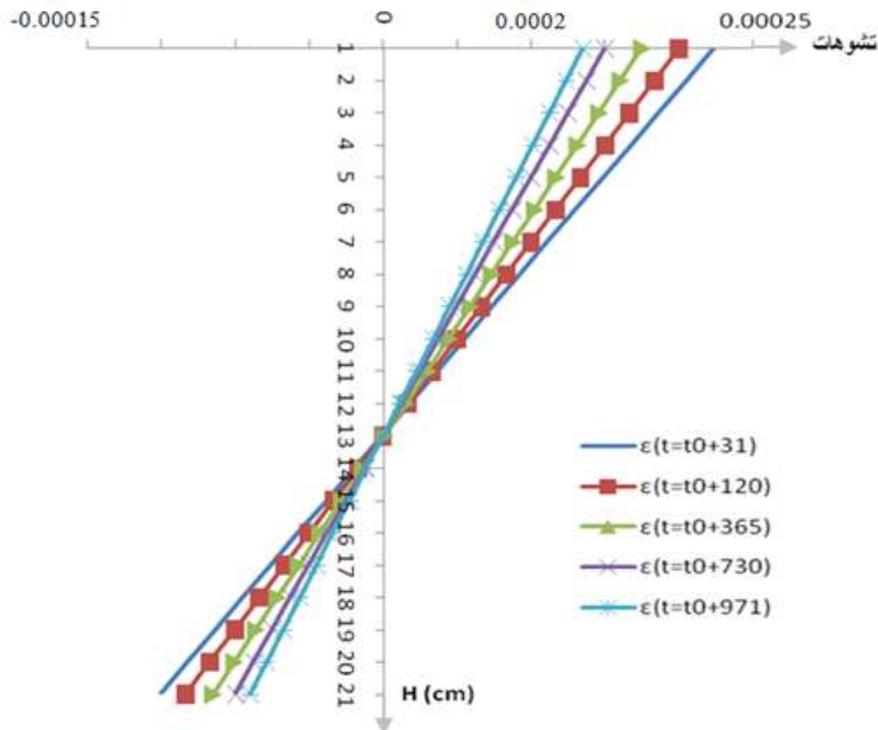


الشكل (12) الإجهادات في الخرسانة

كما يبين الشكل (13) التشوهات في الخرسانة وذلك لتطبيق العددي المدروس والحالة الخطية حيث نسبة

$$\frac{\sigma}{f'_c} \leq 0.4$$

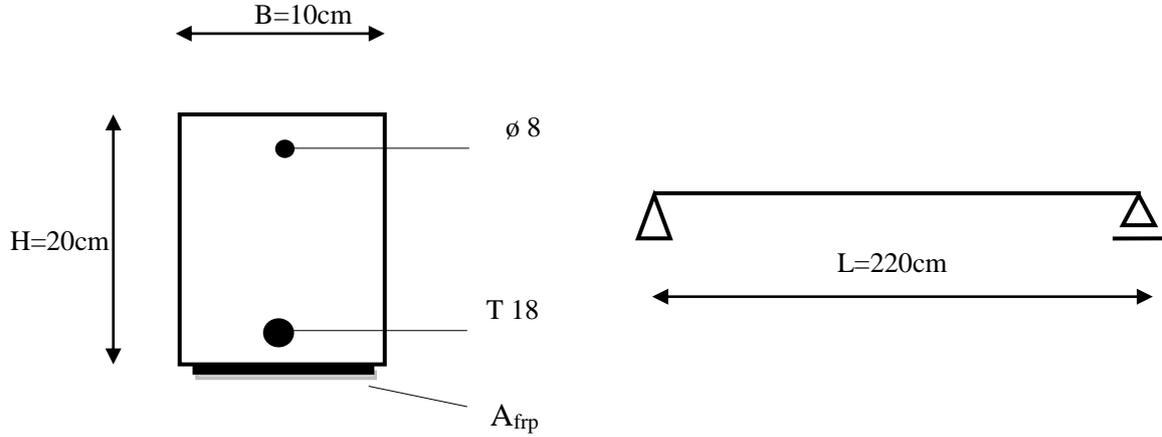
الإجهاد المؤثر إلى المقاومة



الشكل (13) التشوهات في الخرسانة

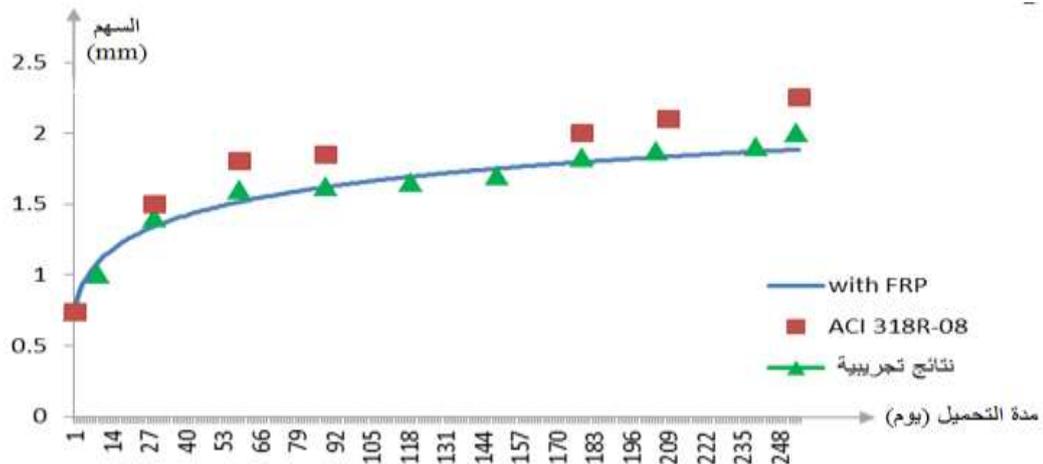
ومن أجل دراسة تأثير إدخال صفائح الـ FRP في تقوية الجائز، أجريت مقارنة وفق الطريقة المقترحة في المخطط التدفقي لتزايد السهم في الجائز الخرساني المسلح المحسوب في التطبيق العددي السابق و الجائز الخرساني نفسه مضافاً إليه تأثير صفائح الـ FRP المبين والمدروس تجريبياً [9]

مواصفات FRP:  $A_{frp} = 60mm^2, E_{frp} = 1,65.10^5 kg/cm^2$



الشكل (14) الجائز المقوى بالـ FRP ومقطع عرضي فيه

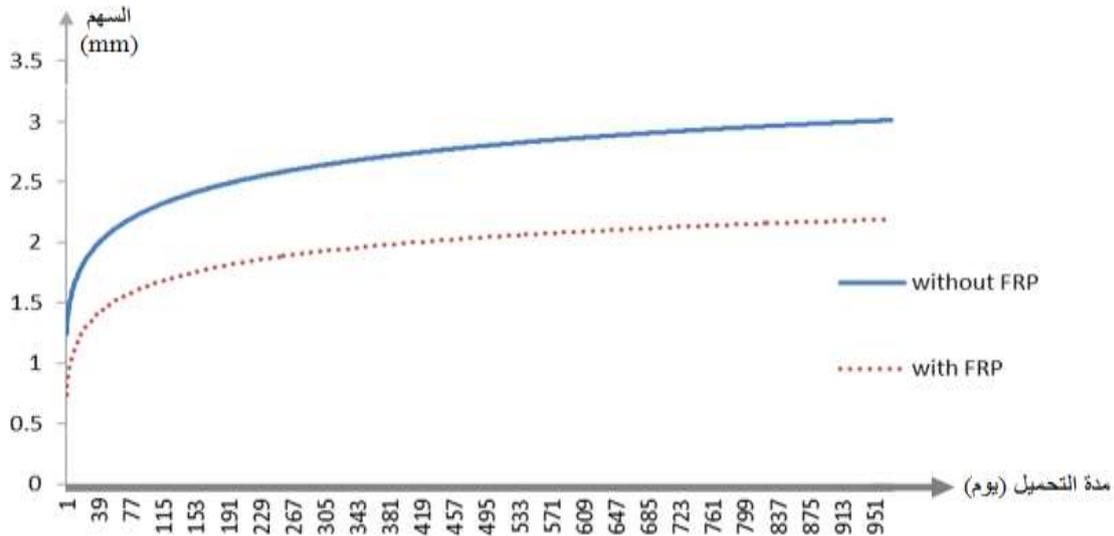
وباستخدام التحليل المقترح في هذه الورقة والمبين في المخطط التدفقي السابق والمعتمدة على الكود الأوربي [4](CEB,90-99) لحساب تزايد التشوهات المتعلقة بالزمن من زحف وانكماش في الخرسانة، وبالاعتماد على العلاقات (8) و (9) لحساب تشوهات الزحف في الـ FRP. يلاحظ من خلال النتائج المبينة في الشكل (15) مدى التطابق في النتائج بين الطريقة المقترحة ونتائج تجارب مخبرية لنفس الجائز وبنفس الأبعاد [9]. كما يلاحظ الفرق بين النتيجة التي يعطيها البرنامج في هذا التطبيق وقيم الكود الاميركي [1](ACI COMMITTEE 318,2008) البسيطة حيث إنه لا يدخل تأثير الـ FRP مع الزمن.



الشكل (15) مقارنة لتزايد السهم مع الزمن بين الطريقة المقترحة

والكود الأمريكي (ACI COMMITTEE 318,2008) [1] ونتائج مخبرية [9] في الجائز المقوى بالـ FRP

كما تم مقارنة نتائج قيم السهوم طويلة الأمد المستنتجة من الأسلوب المقترح في هذه الورقة لحالتي الجائز الخرساني المسلح المدعم وغير المدعم بصفائح الـ FRP الملتصقة خارجياً ولنفس أبعاد المقطع العرضي ولنفس مواصفات التسليح والخرسانة، وبالنتيجة، يمكن التأكيد على الدور الإيجابي الفعال لتقوية الجيزان الخرسانية المسلحة بلصق صفائح الـ FRP في ضبط السهوم المتزايدة مع الزمن حيث من الشكل (16) نلاحظ أن السهوم انخفضت بمقدار ما يقارب 25% في حال كانت مدعمة بالـ FRP



الشكل (16) مقارنة لتزايد السهوم مع الزمن حسب الطريقة المقترحة بين الجائز الخرساني غير المدعم و الجائز المقوى بال FRP

عندما تزيد النسبة  $\frac{\sigma}{f'_c} > 0.4$  فإن تشوهات الزحف تصبح لاخطية ، إن ظاهرة الزحف اللاخطي تؤدي إلى

تغير مخطط الإجهادات في العناصر المعرضة للإنعطاف حيث يعاد توزيع للإجهادات في المقطع العرضي مما يؤدي إلى تغير مخطط الإجهادات في العناصر المعرضة للإنعطاف من مستقيم كما كان في الحالة الخطية إلى منحني في الحالة اللاخطية .

#### تطبيق عددي لحالة الزحف اللاخطي:

ندرس نظرياً ووفق الطريقة المقترحة في المخطط التدفقي السابق تزايد السهوم في الجائز الخرساني المسلح المبين (حالة الزحف اللاخطي)

أبعاد المقطع العرضي

$$B_1 = B_3 = 40 \text{ cm}, B_2 = 15 \text{ cm}, H = 100 \text{ cm}$$

$$L_1 = L_3 = 20 \text{ cm}, L_2 = 60 \text{ cm}$$

$$A'_s = 20 \text{ cm}^2, A_s = 60 \text{ cm}^2, a' = a = 5 \text{ cm}$$

$$f'_c = 200 \text{ kg/cm}^2, E_c = 2.10^5 \text{ kg/cm}^2, n = 10$$

$$L = 1200 \text{ cm}$$

$$t_0 = 28 \text{ days}$$

$$M = 100 \text{ t.m}$$

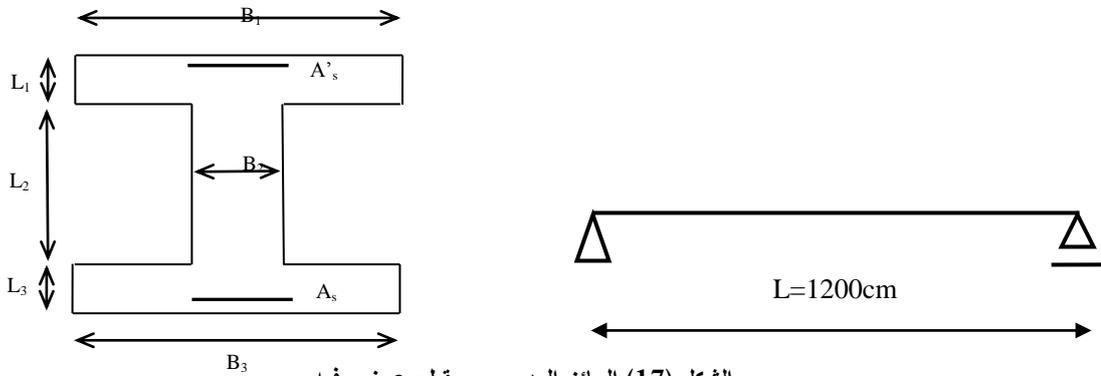
قيمة التسليح المضغوط والمشدود و التغطية

مواصفات المواد

فتحة الجائز

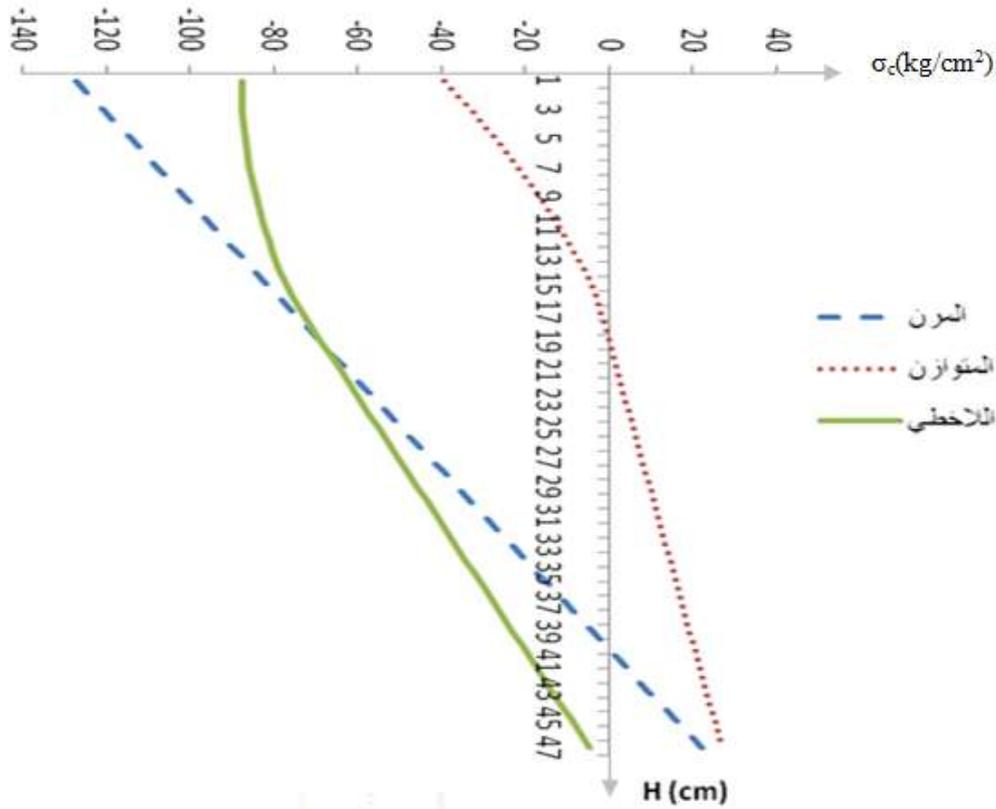
عمر الخرسانة عند التحميل

عزم انعطاف دائم



الشكل (17) الجائز المدروس ومقطع عرضي فيه

يبين الشكل (18) تغير مخطط الإجهادات من مستقيم مائل في الحالة المرنة إلى مخطط منحني في حالة اللابخطية في اليوم الأول من التحميل ، نلاحظ أن الإجهادات في الخرسانة تنخفض في حالة اللابخطية تقريباً إلى  $80 \text{ kg/cm}^2$  وهذه الإجهادات قريبة من نسبة الإجهاد إلى المقاومة المساوية إلى 0.4 أي حالة خطية .



الشكل (18) الإجهادات في الخرسانة في حال التشوهات الملاحطية

إن الملاحطية تؤدي إلى توزيع سريع في مخطط الإجهادات حيث تنخفض فيه الإجهادات الكبيرة في منطقة الضغط وينتقل التوزيع في الإجهادات من مستقيم إلى منحني. ومع زيادة الحمولات يقترب مخطط الإجهادات في منطقة الضغط على التوزيع الثابت (مستطيل) والمعتمد في نظريات الخرسانة منذ عدة عقود.

### النتائج والمناقشة:

1- تم التأكد من الدور الإيجابي لتقوية الجيزان الخرسانية المسلحة بلصق صفائح الـ FRP خارجياً في تحسين سلوك الجائز على الانعطاف وكبح تزايد السهوم مع الزمن، وبمقارنة جائز خرساني مسلح بنفس المعطيات مع آخر مقوى بصفائح الـ FRP وجد أن السهوم طويلة الأمد انخفضت في الحالة المدروسة بمقدار ما يقارب 25% في حال كانت مدعمة بالـ FRP حيث أنه كلما زادت نسبة التقوية بالـ FRP كلما قلت التشوهات وذلك مع ثبات سوية التحميل الدائم.

2- إن الأسلوب التحليلي المقترح في هذه الورقة يعين بدقة تزايد السهوم في الجيزان الخرسانية المسلحة مع الزمن وتلك المقواة بالـ FRP ، كما يعين بدقة قيم تشوهات الزحف والانكماش تحت تأثير كافة العوامل المختلفة من الشروط المحيطية و هي: حجم العنصر، نسبة الماء إلى الإسمنت، نوع الإسمنت، الرطوبة النسبية، سوية الإجهاد، مدة تطبيق التحميل الدائم، عمر الخرسانة عند التحميل وعوامل أخرى.

- 3- إن لتسليح الضغط دوراً كبيراً في الحد من تزايد السهم مع الزمن ، حيث ومع تزايد نسبة التسليح المضغوط إلى التسليح المشدود يصبح مقدار تزايد السهم مع الزمن طفيفاً إلى أن يصبح هذا المقدار ثابتاً عندما تكون نسبة التسليح المضغوط مساويةً لنسبة التسليح المشدود.
- 4- تبين من مقارنة تشوهات الزحف والانكماش المعينة باعتماد الكودات الأربعة أنها تعطي نتائج متقاربة بحدود 20% ولكن الكود الأمريكي (وكذلك الكود العربي السوري الذي يدرج نفس العلاقات) يعطي نتائج أصغر من البقية بفارق 40%.

### الاستنتاجات والتوصيات:

- 1- يوصى باستخدام الطريقة المقترحة في هذه الورقة عند حساب السهم (Deflection) في الجيزان الخرسانية المسلحة والجيزان الخرسانية المسلحة المقواة بال FRP نظراً لسهولة استخدامها ودقة نتائجها التي تتسجم بشكل كبير مع النتائج المخبرية ، وهي تصلح لكافة المقاطع مختلفة الأشكال المتشققة منها وغير المتشققة، وبمختلف أعمار الخرسانة عند التحميل.
- 2- يوصى بإجراء تجارب لدراسة ظاهرة الزحف في ال FRP ولأنواع مختلفة منها، ودراسة نتائجها على سلوك الجيزان الخرسانية المسلحة المقواة بها.
- 3- يوصى بدراسة البارامترات والعوامل المؤثرة على السلوك الطويل الأمد للجيزان الخرسانية المسلحة مقواة بال FRP.

### المراجع:

1. ACI COMMITTEE 318,, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, USA, January 2008.
2. ACI COMMITTEE 435, Guide Control of Deflection in Concrete Structures in hardened concrete, USA, Reapproved 2000 Appendix B added 2003.
3. ACI COMMITTEE 209, Guide for modeling and calculating shrinkage and creep in hardened concrete, USA, May 2008.
4. CEB-FIP Model Code 1990, CEB Bulletin d'Information, No. 213/214, Comité Euro-International du Béton, Lausanne -Switzerland, 1990.
5. H.S. Muler: C. H. Kuttner: V. Kuitsel, Creep and Shrinkage Models for Normal and Unified Code-Type Approach, eds. F.J. ulm, M. Prat, J. A. Calgaro and I Card Revue Francaise de Hernes Science, Publication, Paris 1999, Génie Civil. P 15-19. PP. 113-132.
6. Antonio R. Marí : Jesús M. Bairán, Long-term deflections in cracked reinforced concrete flexural members, Noemi Duarte-Universitat Politècnica de Catalunya, Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona, Spain-2010.
7. K.H. Tan: M.K. Saha: Y.S. Liew, FRP-strengthened RC beams under sustained loads and weathering, National University of Singapore, 2009.
8. Ulitsky.II, Theory and calculation of reinforced concrete beam structures with the long processes, Mear Publisher 1998.
9. M.K. Saha, Long-Term behavior of FRP strengthened RC Beams, National University of Singapore, 2006.

10. Bonacci, J.F and Maalej, M. (2001).Behavioral Trends of RC Beams Strengthened with Externally Bonded FRP. Journal of Composites for Construction, Vol.5, No.2, pp.102-113.

11. Holmes.M and Just,D.J, GRP in Structural Engineering, pp.20-23,213-229, Essex: Applied Science Publishers Ltd,1983.

12. Dai, Jian-Guo; Yokota, Hiroshi; Iwanami, Mitsuyasu; Kato, EMA Experimental Investigation of the Influence of Moisture on the Bond Behavior of FRP to Concrete Interfaces, Journal of Composites for Construction, 11.2010.

13. وائل منير صقر ، تأثير الزمن على الانحراف في الجوائز الخرسانية المسلحة، مجلة جامعة الملك

عبدالعزیز :العلوم الهندسية، م ١٨ ع ١، 2007

14. نقابة المهندسين الجمهورية العربية السورية، الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت بالخرسانة

المسلحة، الطبعة الرابعة، دمشق 2012