دراسة تزايد السهوم في الجيزان الخرسانية المسلحة مع الزمن*

المهندسة ديانا وردة** الأستاذ الدكتور المهندس محمد غريب**

الملخص

يؤدي تزايد السهوم في الجيزان الخرسانية المسلحة مع الزمن والناتج عن ظاهرتي الزحف والانكماش إلى تضرر العناصر الحاملة والعناصر غير الحاملة التي يجب تقديرها بدقة في مرحلة التصميم.

تتأثر ظاهرتا الزحف والانكماش بالشروط المحيطية: حجم العنصر، نسبة الماء إلى الاسمنت، نوع الاسمنت والرطوبة النسبية. ويتعلق الزحف أيضاً بسوية الإجهاد وبمدة تطبيق التحميل الدائم وعمر الخرسانة عند التحميل. كما أن تزايد السهوم الناتج عن الزحف والانكماش يتعلق بمقدار التسليح في المنطقة المضغوطة ، وشروط الاستناد ونوع المنشأة فضلاً عن عوامل أخرى .

إن التنبؤ الدقيق بتزايد السهوم في العناصر الخرسانية المسلحة مع الزمن يتطلب دراسة التحليل اللاخطي للتأثيرات المتعلقة بالزمن، إذْ إنَّ هذه الدراسات التجريبية عادة تستغرق زمناً طويلاً وتتطلب جهداً كبيراً. ويعتمد في التصميم أساليب بسيطة لتعيين تزايد السهوم مع الزمن وبهدف تصميم دقيق للمنشآت قمنا بتطوير العديد من الأساليب المدرجة في الكودات العالمية والمحلية [9-4-3-2-1] وبُرمِجَت العلاقات الخاصة بالزحف والانكماش للوصول إلى طريقة تجمع بين البساطة والدقة وتقدم معلومات قيِّمة عن تأثير العوامل المختلفة في السهوم المتزايدة مع الزمن. كما أن نتائج الطريقة المقترحة وافقت نتائج تجارب مخبرية مجراة سابقاً بشكل جيد [8].

نخلص إلى أنه يمكن الاعتماد على الطريقة المقترحة للتنبؤ الدقيق بالسهوم في أي وقت من مرحلة الاستثمار للمنشآت الخرسانية العادية وعالية المقاومة، وفي أي عمر تحميل للخرسانة وتحت تأثير تشوهات الزحف والانكماش ومشاركة التسليح في منطقة الضغط.

الكلمات المفتاحية: الجيزان الخرسانية المسلحة، السهم، الزمن، الزحف، الانكماش، تسليح الضغط .

* أعِدَّ البحث في سياق رسالة ماجستير للمهندسة ديانا وردة بإشراف الأستاذ الدكتور محمد غريب

** أستاذ - قسم الهندسة الإنشائية كلية الهندسة المدنية جامعة دمشق

*** طالبة ماجستير- قسم الهندسة الإنشائية كلية الهندسة المدنية جامعة دمشق

مقدمة:

إن استعمال طرائق تصميم أكثر دقة وكفاءة، واستعمال خرسانة وحديد تسليح بمقاومات عالية أدّيا إلى اعتماد مقاطع أصغر للعناصر الإنشائية. وهذا أدّى بدوره إلى حدوث سهوم (deflections) أكبر، ومن ثمَّ أدّى إلى ضرورة تأمين طرائق فعالة تأخذ بالحسبان العوامل التي تحدد السهم طويل الأمد بدقة، ومن أهم هذه العوامل:

1- تأثير التسليح - في منطقة الضغط - في تطور الزحف، ومن ثمَّ في تزايد السهوم مع الزمن. ومن المعروف أن التسليح في منطقة الضغط يحد من التشوهات النهائية مع الزمن. فهو يؤدي إلى تناقص إجهادات الضغط في الخرسانة وتزايدها في الفولاذ مع الزمن. كذلك فإن ظاهرتي الزحف والانكماش في الخرسانة تؤديان إلى زيادة تدريجية في السهوم مع الزمن .

2- صعوبة تحديد المرحلة التي تبدأ عندها الخرسانة المسلحة في التشقق. كذلك فإن الرطوبة والحرارة، وظروف المعالجة، ونسبة الإجهاد المؤثر إلى المقاومة (سوية الإجهاد)، وعمر الخرسانة عند تطبيق الحمل كلها تؤثر في زيادة السهم.

وبالنظر إلى الأسباب التي أشير إليها آنفاً، يتبين لنا مدى صعوبة تحديد مقدار السهم المتشكل بدقة ولاسيَّما تزايد السهم مع مرور الزمن (Long-Term deflection) وهو التغير الناتج عن تأثير التشوهات المتعلقة بالزمن (الزحف والانكماش). إن لجنة السهوم ACI 435R-95 [2] ولجنة الزحف والانكماش

ACI 209.2R-08 [3] تعطي خطوطاً بيانيةً وصيغاً حسابية لتحديد مقدار التزايد في السهوم مع مرور الزمن الذي يمكن أن يكون أكبر مرتين من السهم الأولي (Short-Term Deflection)، وقد تتجاوز القيمة الكلية للسهم طويل الأمد الحدَّ المسموح به مما يسيئ إلى مظهر المنشأة، ويعطي فكرة خطأ عن سلامة المنشأة وأمانها.

هَدَفَ البحث إلى الوصول إلى نتائج نظرية أكثر دقة لتعيين السهوم المتزايدة في الجيزان الخرسانية المسلحة مع الزمن، حيث تُؤخذُ بالحسبان أغلب العوامل المؤثرة في تزايد السهوم مع الزمن، وأهمها تأثير تسليح الضغط، وكذلك تأثير تزايد تشوهات الزحف والانكماش (Creep and Shrinkage) تبعاً لأحدث إصدارات الكودات. وقد طُبِّقَ الأسلوب العددي في الطريقة المقترحة، وقُسِّمَ الزمن إلى مراحل لتعيين تطور الوضعية الإجهادية باعتبار السلوك الخطي واللاخطي للزحف.ومن ثم قورنت هذه النتائج بنتائج تجريبية قام بها باحثون آخرون، ومع النتائج المعينة وفق الكود الأمريكي [1] ACI-318R-08 والكود العربي السوري[9] .

أهمية البحث:

يمكن اعتبار المنشأة مقبولة وفق طريقة حالات الحدود في التصميم وذلك عند مرحلة زمنية معينة من عمر المنشأة، في حين تصبح - بعد مدة زمنية - مرفوضة نتيجة تزايد السهوم عن الحد المسموح به. لذلك يجب القيام بتعيين دقيق لتزايد السهوم مع الزمن، وقد حظى هذا البحث باهتمام العديد من الباحثين [11-10-6].

إن تزايد السهوم يؤدي إلى شعور الناس بعدم الارتياح إلى السلامة الإنشائية للمنشأة. ويصاحب تزايد السهوم انفتاح الشقوق وهو الأمر الذي يؤدي إلى صدأ قضبان التسليح وزيادة حجم التسليح وتصدع طبقة الحماية وسقوطها، ومن ثمَّ إلى نقصان في الصلابة وتزايد متتابع في السهوم. كما أن تزايد السهوم يؤدي إلى تشوه العناصر الإنشائية غير الحاملة ومن ثمَّ تشوه المظهر المعماري .

من الجدير بالذكر أن لجنة السهوم في الكود الأميركي ACI 435R-95 أوردت أن الصيغة $\delta_{LT} = \delta_L + \lambda_t.\delta_{sus}$ تعطي قيمة السهم بدقة % (20 -40) من قيمة السهم الحقيقي [2] ، وهذا يدلُّ على مدى صعوبة تحديد تزايد السهوم مع الزمن. وكذلك فإن حل المعادلات التكاملية لتعيين الوضعية الإجهادية للعناصر الخرسانية المعرضة للانعطاف مع اعتبار الزحف والانكماش من الأمور المعقدة .

الفرضيات الأساسية المعتمدة:

من أجل التوصل إلى تعيين دقيق لتزايد السهوم في الجيزان الخرسانية المسلحة مع الزمن، نفترض ما يأتي:

- المقطع العرضي قد يكون متشققاً أو غير متشقق، ومعرضاً لعزم انعطاف ثابت.
- المقاطع المستوية قبل التشوه تبقى مستوية بعد التشوه.
- وجود تماسك تام بين الخرسانة وحديد التسليح.
- تعدُّ تشوهات الزحف بالنسبة إلى الإجهاد المطبق خطية إذا كانت سوية الإجهاد (نسبة الإجهاد المؤثر إلى المقاومة) $\frac{\sigma}{f'_c} \le 0.4$ ، وتعدُّ تشوهات الزحف لاخطية إذا كانت سوية الإجهاد $\frac{\sigma}{f'_c} > 0.4$

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

يعين تزايد السهوم مع الزمن (Long-Term Deflection) الناتج عن تزايد تشوهات الزحف والانكماش وفق الكود الأمريكي ACI-318R-08 [1] و ACI-435R-95 [2] بإدخال العامل λ_t في الصيغة الآتية:

$$\delta_{LT} = \delta_L + \lambda_t.\delta_{sus} \qquad (1)$$

إذْ :

δ_L السهم الآني الناتج عن الحمولة الحية

δ_{sus} السهم الآني الناتج عن الحمولة الدائمة (الحمولة الدائمة هي الحمولة الميتة مضافاً إليها ربع الحمولة الحية)

λ_t عامل تزايد السهم مع الزمن والمعتمد خلال مدة زمنية t

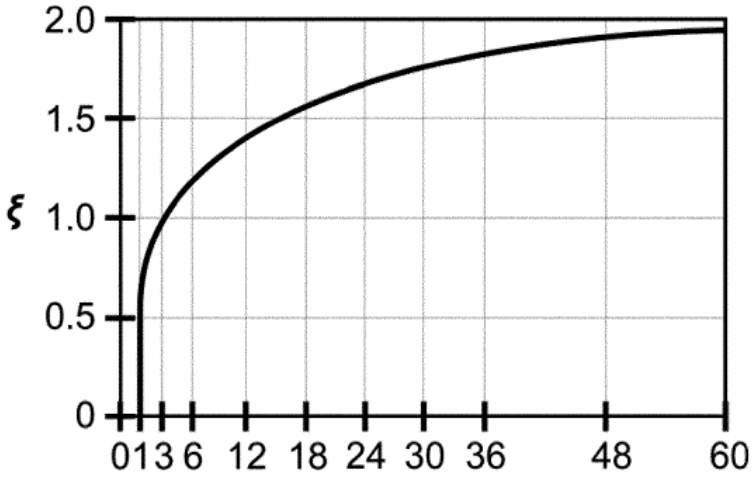
$$\lambda_t = \frac{\xi}{1+50\rho'} \qquad (2)$$

ρ' نسبة التسليح المضغوط في منتصف الفتحة للجوائز المستمرة أو وحيدة الفتحة وفوق المسند في الجوائز الظفرية .

ξ عامل تأثير الزمن في السهم ويؤخذ مساوياً إلى :

2 للتحميل مدة 5 سنوات أو أكثر.
1.4 للتحميل مدة 1 سنة.
1.2 للتحميل مدة 6 أشهر.
1 للتحميل مدة 3 أشهر.

ويمكن اعتماد الشكل (1) لتعيين قيمة ξ خلال مدة زمنية تقل عن خمس سنوات .



الشكل (1): قيمة ξ حسب الكود الأمريكي ACI-318R-08
مدة التحميل (أشهر)

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 بالحسبان مواصفات المادة الحقيقية (كمية الاسمنت، نسبة الماء إلى الاسمنت، نوع الاسمنت، نوع الحصويات، المحتوى الهوائي، أبعاد العنصر، عمر الخرسانة عند التحميل، الرطوبة النسبية، وغيرها) يقترح اعتماد معطيات أحد النماذج الآتية:

CEB MC90 Model , GL2000 Model , ACI209)
[3-4] (Model , B3 Model

وقد بُرمِجَتْ العلاقات الموجودة في هذه الكودات لتكون برامج فرعية ضمن البرنامج الحاسوبي الذي يقوم بحساب تزايد السهوم في الجيزان الخرسانية المسلحة مع الزمن آخذاً بالحسبان تزايد تشوهات الزحف والانكماش، وكذلك تأثير نسبة التسليح المضغوط.

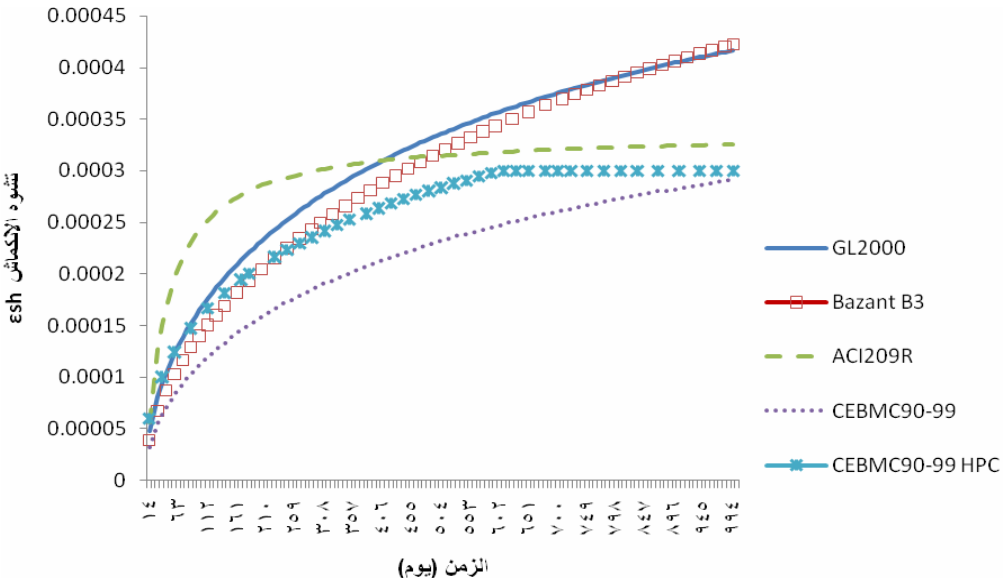
كما أجريت مقارنة لهذه النتائج، ويبيّن الشكل (2) والشكل (3) الفروقات بين هذه النماذج في تحديد قيم تشوهات الانكماش والزحف مع الزمن. ونقوم بتعين عامل الزحف لواحدة الإجهاد $J(t,t_0)$ وتشوه الانكماش $\varepsilon_{sh}(t,t_0,t_s)$ مع الزمن باستخدام العلاقات الموجودة في النماذج الأربعة المذكورة سابقاً إذْ كل من هذه المعاملات تتعلق بعدة برامترات تصف الشروط المحيطية وخواص المادة الحقيقة وهي تختلف من نموذج إلى آخر .

$$J(t,t_0)=\frac{1}{E_C}\left[n(t_0)+\varphi(t,t_0)\right] \qquad (3)$$

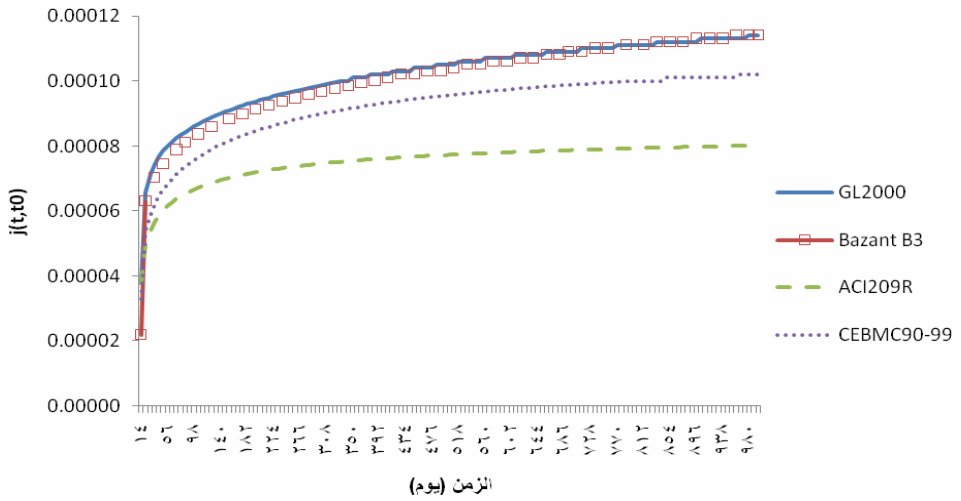
$$E_C(t_0)=\frac{\sigma_c(t_0)}{\varepsilon_{ci}(t_0)} \qquad (4)$$

$$n(t_0)=E_C/E_C(t_0) \qquad (5)$$

t عمر الخرسانة لحظة الحساب
t_0 عمر الخرسانة عند التحميل
t_s عمر الخرسانة عند بداية التجفيف
$\varphi(t,t_0)$ عامل الزحف
$\sigma_c(t_0)$ الإجهاد المطبق وقت التحميل
$\varepsilon_{ci}(t_0)$ التشوه الأولي (المرن)



الشكل(2): مقارنة لنماذج تقدير الانكماش وفق [3-4]



الشكل(3): مقارنة لنماذج عامل الزحف لواحدة الإجهاد وفق [3-4]

كيفية حساب السهم طويل الأمد (Long-Term Deflection) في الكود العربي السوري[9]:

يعيّن تزايد السهوم مع الزمن وفق العلاقة من الكود العربي السوري وهي مماثلة للعلاقة المعتمدة في ACI-318R-08 مع بعض الفروقات البسيطة :

$$\alpha = \frac{\xi}{1 + 50\ \frac{A'_s}{b.d}} \qquad (6)$$

إن ξ معامل تجريبي يتعلق بمدة التحميل للأحمال الدائمة التي انقضت وقت حساب السهم، وذلك عندما يكون عمر البيتون عند البدء بتطبيق الأحمال لا يتعدى الثلاثة الأشهر، ويؤخذ على الشكل الآتي:

$$\left[\frac{\sigma_c}{E_c}\right], + \left[\frac{f(\sigma_c)\varphi_t}{E_c}\right] + \int_0^t \left\{\frac{d\sigma_c(t_0)}{dt_0}.\frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{df[\sigma_c(t_0)]}{dt_0}.\frac{\varphi_t - \varphi_{t_0}}{E_c}\right\} dt = \frac{\sigma_s(t)}{E_s} \qquad (7)$$

الكود العربي السوري	***ACI-318R-08***
2 للتحميل مدة 3 سنوات أو أكثر	2 للتحميل مدة 5 سنوات أو أكثر
1.4 للتحميل مدة 1 سنة	1.4 للتحميل مدة 1 سنة
1.2 للتحميل مدة 0.5 سنة	1.2 للتحميل مدة 0.5 سنة
1 للتحميل مدة 1 شهر	1 للتحميل مدة 3 شهر

دراسة تطور الوضعية الإجهادية للعناصر الخرسانية المسلحة المعرضة للانعطاف 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 معامل مرونة الخرسانة

E_s معامل مرونة الفولاذ

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

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

φ_t معامل الزحف الخطي في الزمن t

φ_{t0} معامل الزحف الخطي في الزمن t_0 لكل حمولة

استخدام الطريقة العددية في حساب تزايد السهوم في الجيزان المعرضة للانعطاف مع الزمن:

إن حل هذه المعادلات يتم وفق طريقة عددية وذلك بتقسيم الزمن إلى مراحل صغيرة تثبت فيها الوضعية الإجهادية، وتقاس خلالها تشوهات الخرسانة التي تعدُّ في نهايتها تشوهات قسرية تطبق على العنصر.ويتم ذلك وفق المراحل الآتية:

1- إدخال شكل المقطع العرضي ويمكن أن تعتمد مجموعة من النماذج للمقاطع العرضية المعروفة (مستطيل، مقطع I، مقطع T، مقطع صندوقي، غيرها من الأشكال)

2- إدخال أبعاد المقطع العرضي

3- إدخال كمية التسليح المشدود والمضغوط ومواقعهما وعامل مرونة الفولاذ المستخدم

4- إدخال مواصفات الخرسانة $f`_c$ ، عمر الخرسانة عند التحميل t_0

5- إدخال القوى المطبقة N و M

6- إدخال العوامل التي تتعلق بنماذج التنبؤ بالزحف والانكماش حسب النماذج الاربعة [3-4] (كمية الاسمنت، نسبة الماء إلى الاسمنت، نوع الاسمنت، نوع الحصويات، المحتوى الهوائي، أبعاد العنصر، عمر الخرسانة عند التحميل، الرطوبة النسبية، وغيرها)

7- حساب الخواص الهندسية للمقطع العرضي

8- حساب الإجهادات الناظمية في المقطع العرضي، في حال وجود إجهادات شد تزيد على مقاومة الخرسانة المستخدمة للشد يعدُّ المقطع متشققاً يعاد حساب الخواص الهندسية للمقطع العرضي وتعين الإجهادات في المقطع العرضي المار من الشق

9- تعيين تشوهات الزحف والانكماش في كل مرحلة زمنية Δt كمجموع للتشوهات السابقة وباعتبار القوى الداخلية ثابتة في كل المرحلة

في حالة الزحف الخطي :

$$\varepsilon_{cr} = \sum \frac{\varphi(t,t_0)}{E(t)} \Delta\sigma_{\tau i} \qquad (8)$$

في حالة الزحف اللاخطي :

$$\varepsilon_{cr} = \sum \frac{\varphi(t,t_0)}{E(t)} .\Delta f(\Delta\sigma_{\tau i}) \qquad (9)$$

تحسب التشوهات الكلية في العنصر بمرحلة معينة كمجموع لتشوهات الزحف والتشوهات الآنية المرنة فضلاً عن التشوهات الناتجة عن الانكماش حتى الزمن المدروس وذلك من الصيغة

$$\Delta\varepsilon(t) = \frac{\sum\sigma}{E(t)} + \sum \frac{\varphi(t,t_0)}{E(t)} .\Delta\sigma_{\tau i} + \varepsilon_{sh}(t) \qquad (10)$$

10- تطبيق تشوهات الزحف والانكماش بوصفها تشوهات قسرية على المقطع.

- في حال زيادة الإجهاد الناظمي في المقطع العرضي المدروس عن $0.4\, f`_c$ فإن تشوهات الزحف اللاخطية تعين مع اعتماد الكود الأوربي CEB MC90 Model [4]

$$\varphi(t,t_0) = \varphi_o .\exp\left[1.5\left(\frac{\sigma}{f'_c} - 0.4\right)\right] \qquad (11)$$

- في حال وجود تشوهات زحف لاخطية فإن هذه التشوهات القسرية تؤول إلى توزع لاخطي للإجهادات في المقطع العرضي، وتعيّن أولاً قوة التثبيت N_{fix} وعزم التثبيت M_{fix} الناتج عن التشوهات القسرية. ومن ثم نعين تزايد الإجهادات الإضافية في الخرسانة والفولاذ والناتجة عن الزحف والانكماش في المرحلة الزمنية المدروسة.

- يتم التأكد من أن تزايد القوى الداخلية في الفولاذ والتسليح والقوى الناتجة عن الزحف والإنكماش متوازنة.

- نحسب تزايد الإجهادات في قضبان التسليح المضغوط وتناقصها في الخرسانة في المقطع العرضي المدروس في نهاية Δt .

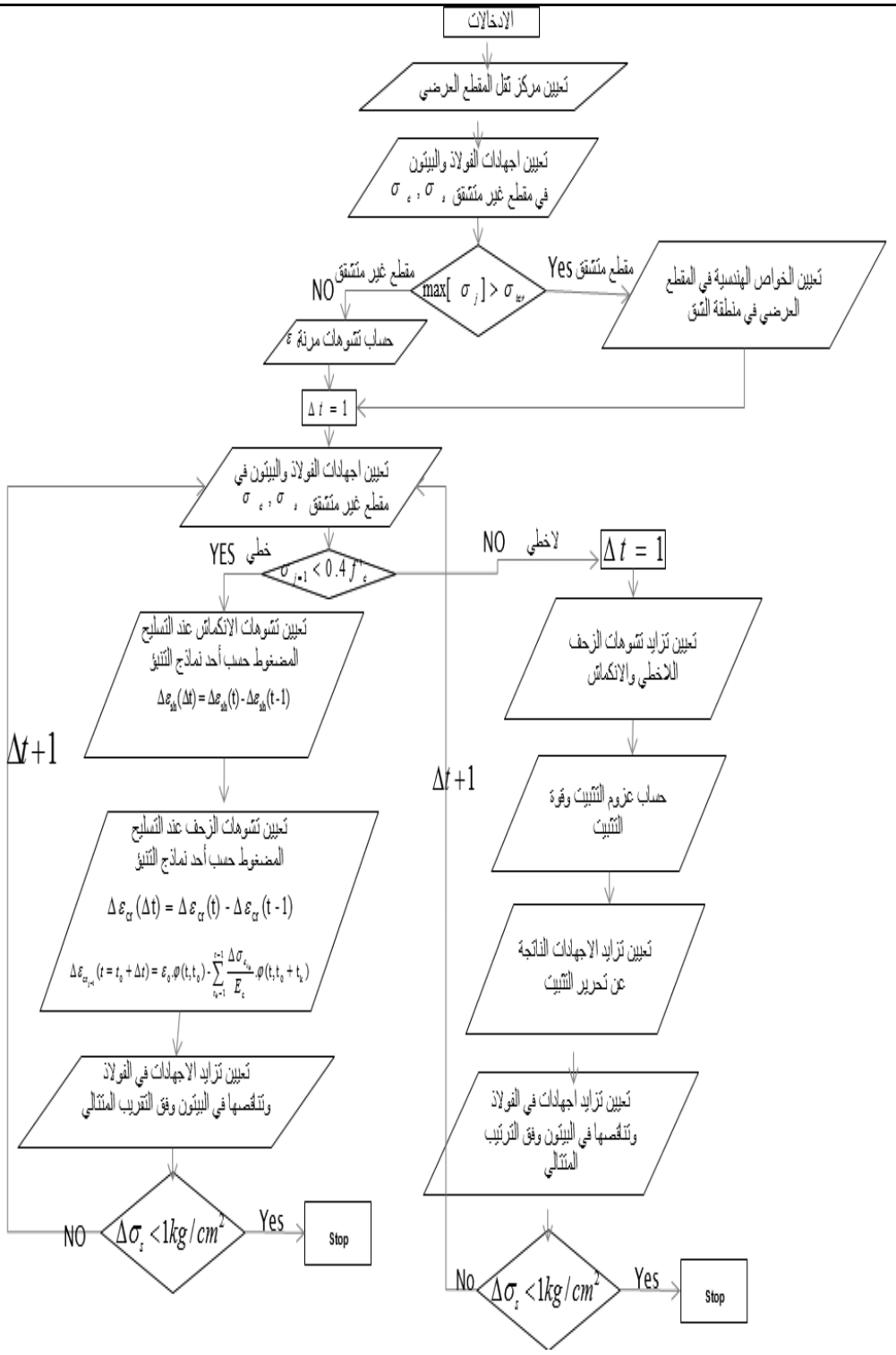
- ننتقل إلى مرحلة زمنية جديدة Δt_i .

- يتوقف البرنامج وتثبت النتائج في إحدى الحالات الآتية:

1- إذا كانت زيادة تشوهات في المرحلة Δt_i متناهية في الصغر، ومن ثمَّ فإن تغيّر الإجهادات صغير جداً وهذا يعني تخامد تشوهات الزحف دون انهيار في العنصر(في المنطقة المضغوطة).

2- تزايد الإجهادات في الفولاذ حتى حد الزحف في الفولاذ المستخدم $f_y = 2100\ \ kg/cm^2$ للفولاذ الأملس و $f_y = 4200\ \ kg/cm^2$ للفولاذ المحلزن (في المقطع المضغوط).

ويبيّن الشكل(4) مخططاً تدفقياً يوضح سير العمل من أجل الحساب الدقيق لتزايد السهوم في الجيزان الخرسانية المسلحة مع الزمن.



الشكل (4): المخطط التدفقي لحساب تزايد السهوم في الجيزان الخرسانية المسلحة مع الزمن

مثال:

ندرس نظرياً ووفق الطريقة المقترحة في المخطط التدفقي السابق تزايد السهوم في الجائز المبين والمدروس تجريبياً[8]

إذْ أبعاد المقطع العرضي $B = 10\,cm\,, H = 20\,cm$ $a' = a = 1cm$

قيمة التسليح المضغوط والمشدود:

$A'_s = 1\phi 8\,, A_s = 1T18$

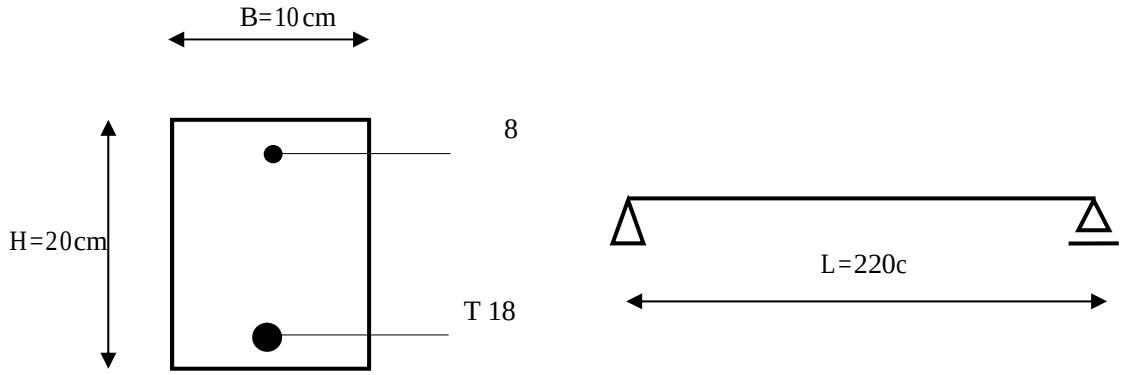
مواصفات المواد:

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

فتحة الجائز: $L = 220cm$

عمر الخرسانة عند التحميل: $t_0 = 28\,days$

عزم انعطاف دائم : $M = 4.8\,t.m$



الشكل (5): الجائز المدروس ومقطع عرضي فيه

ولحل المثال اخترنا الكود الأوربي CEB-MC90-99 [4] لحساب تزايد التشوهات المتعلقة بالزمن من زحف وانكماش، ويبيّن الشكل(6) تشوهات الزحف مع اختلاف عمر التحميل للخرسانة وتشوهات الانكماش للإدخالات الآتية:

- $t_s = 1$ عمر لخرسانة عند بداية التجفيف.
- N, R نوع الاسمنت : عادي أوسريع التصلب.
- $RH = 70\%$ الرطوبة النسبية.

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

- مواصفات الخرسانة.
- $H = 20\,cm$ ارتفاع المقطع.

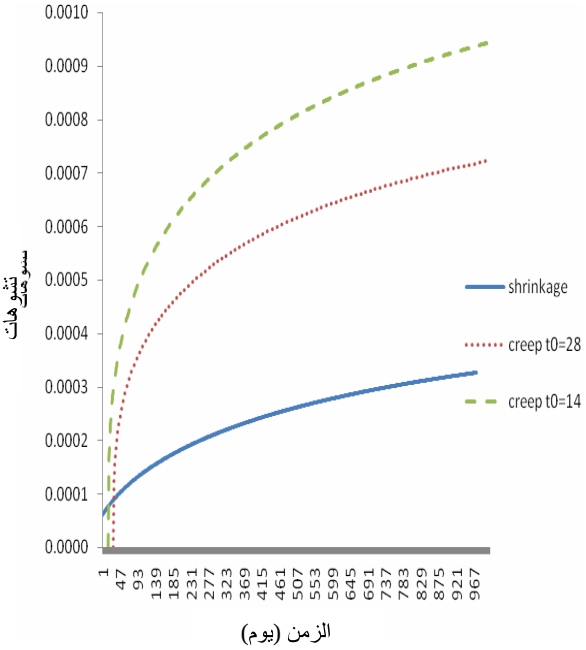
حيث اعتمد للمثال المدروس العلاقات الموجودة في الكود الأوربي CEB-MC90-99 [4] .

وأخذ تابع تشوهات الانكماش الشكل الآتي:

$$\varepsilon_{sh} = 700.10^{-6}.\left[\frac{f'_c/100}{6+f'_c/100}\right]^{2.5}.\left(1-e^{-0.2\sqrt{t}}\right)-671.88.10^{-6}.\left[\frac{t-t_s}{1400+t-t_s}\right].e^{-0.11.f'_c/100} \qquad (12)$$

وتابع معامل الزحف :

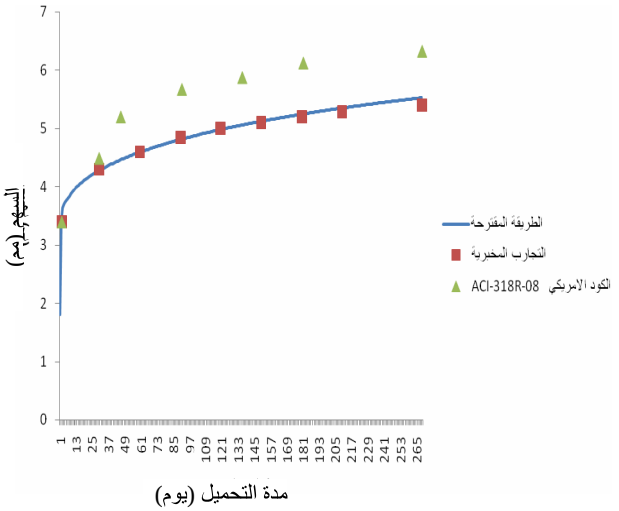
$$\varphi(t,t_0)=8.7207*\left(\frac{1}{0.1+t^{0.2}}\right).\left(\frac{t-t_0}{1984.35+t-t_0}\right)^{0.3} \qquad (13)$$



الشكل(6): تشوهات الزحف باختلاف عمر التحميل وتشوهات الانكماش حسب الكود الأوربي [4]

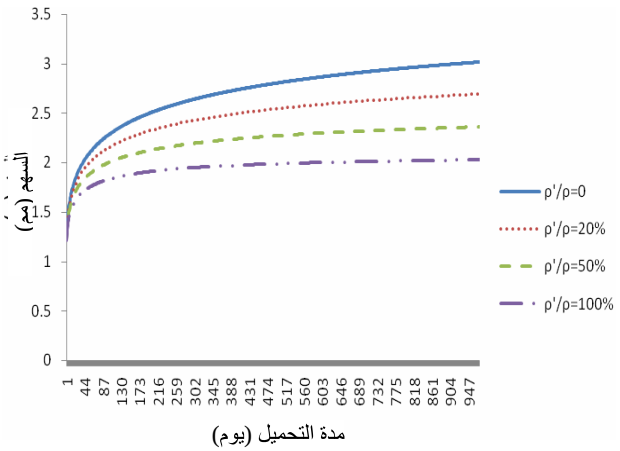
وقد أُجريَ الحساب باستخدام التحليل المقترح في هذه الورقة وطريقة الحساب خطوة بخطوة (Step-by-Step) وهي المبينة في المخطط التدفقي السابق والمعتمدة على الكود الاوربي CEB-MC90-99 [4] لحساب تزايد التشوهات المتعلقة بالزمن من زحف وانكماش.

يلاحظ من خلال النتائج المبينة في الشكل(7) مدى التطابق في النتائج بين الطريقة المقترحة ونتائج تجارب مخبرية للجائز نفسه وبالأبعاد نفسها [8]. كما يلاحظ الفرق الكبير بين النتيجة التي يعطيها البرنامج وقيم الكود الأميركي ACI-318R-08 [1] البسيطة إذْ إنَّه مع تزايد الزمن يكون السهم الحقيقي في اليوم 270 أصغر من السهم المحسوب حسب الكود الأمريكي بـ 20%. كما أن نتائج التي يعطيها الكود العربي السوري قريبة جداً من الكود الأمريكي ACI-318R-08.



الشكل (7): مقارنة لتزايد السهوم مع الزمن بين الطريقة المقترحة والكود الأمريكي ACI-318R-08[1] ونتائج مخبرية[8]

يبدو تأثير فولاذ التسليح المضغوط واضحاً في الشكل (8) إذْ إن زيادة كمية التسليح المضغوط تؤدي إلى تناقص إجهادات الضغط في الخرسانة على الرغم من ظهور الشقوق على طول المقطع وتزايد الإجهادات في الفولاذ مع الزمن، ومن ثمَّ فإن زيادة التسليح المضغوط يكبح من تزايد السهوم مع الزمن.

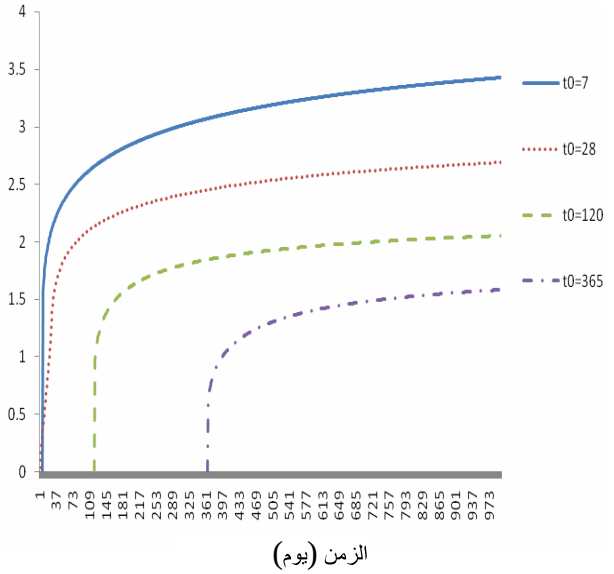


الشكل (8): تزايد السهوم مع الزمن باختلاف نسبة التسليح المضغوط

ρ نسبة التسليح المشدود

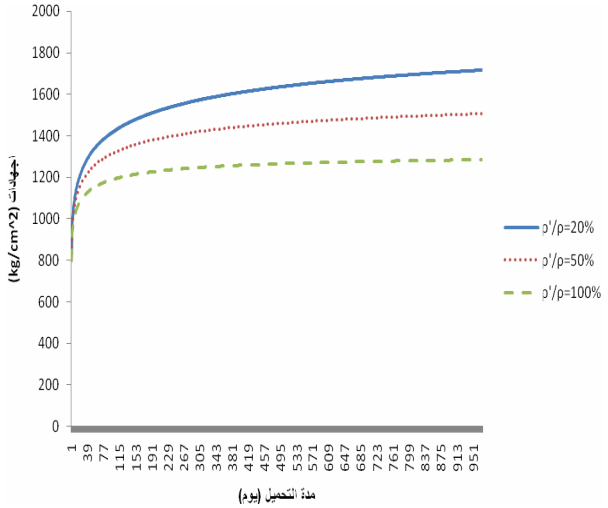
ρ' نسبة التسليح المضغوط

كما أن لعمر الخرسانة عند التحميل أهمية كبيرة وتأثيراً كبيراً في قيم تزايد السهوم مع الزمن وإن هذا العامل غير مأخوذ بالحسبان في الكود الأمريكي ACI-318R-08 ، إذْ نلاحظ في الشكل (9) أن تزايد السهم مع الزمن ينخفض بمقدار 27% في حال كان التحميل 28 يوماً عنه لو كان 7 أيام.



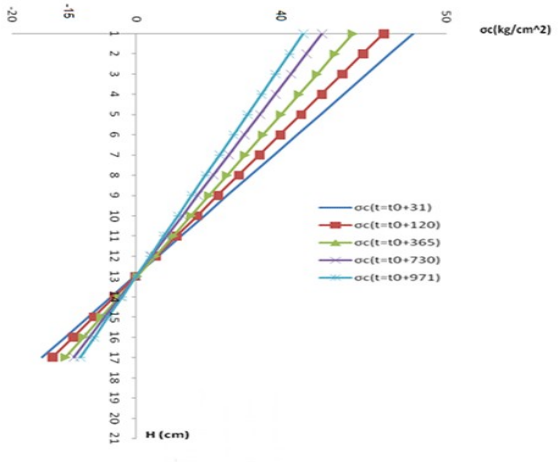
الشكل(9): تزايد السهم مع الزمن باختلاف عمر الخرسانة عند التحميل

تترافق زيادة كمية التسليح المضغوط بنقصان في تغير الإجهادات عند منسوب التسليح المضغوط بمقدار يقارب 33% في حال كانت زيادة نسبة التسليح المضغوط في الجائز من $\rho'=0.2\rho$ إلى $\rho'=\rho$ ، ويوضح الشكل (10) هذا التناقص في الإجهادات مع تزايد كمية التسليح المضغوط.



الشكل(10): تزايد إجهادات عند منسوب التسليح المضغوط

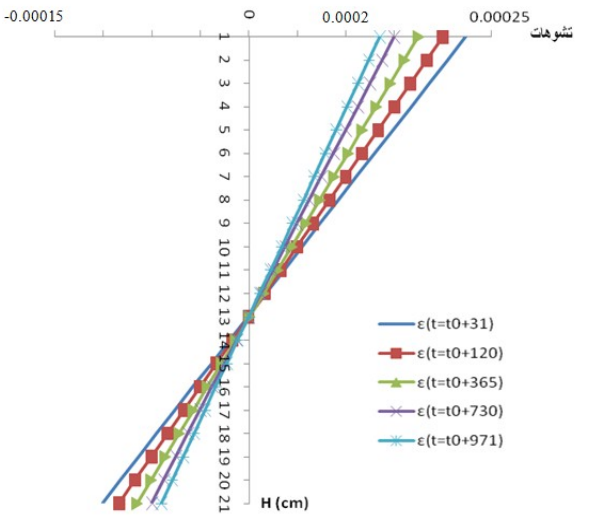
ويبيّن الشكل(11) تناقص إجهادات الضغط في الخرسانة على الرغم من وجود الشقوق نتيجة الزحف ومشاركة التسليح في المنطقة المضغوطة. ونلاحظ أن المثال المدروس يحوي على إجهادات شد تزيد على مقاومة الخرسانة المستخدمة للشد يعدُّ المقطع المتشقق



الشكل(11): الإجهادات في الخرسانة

يبيّن الشكل (12) التشوهات في الخرسانة للمثال المدروس في الحالة الخطية حيث نسبة الإجهاد المؤثر إلى المقاومة

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



الشكل(12): التشوهات في الخرسانة

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 للانعطاف حيث تحصل إعادة توزيع للإجهادات في المقطع العرضي مما يؤدي إلى تغير مخطط الإجهادات في العناصر المعرضة للانعطاف من مستقيم كما كان في الحالة الخطية إلى منحنى في الحالة اللاخطية وللإدخالات التالية رُسِمَ مخطط الإجهادات في حالة اللاخطية: إذْ أبعاد المقطع العرضي

قيمة التسليح المضغوط والمشدود:

$$A'_s = 20\,cm^2 , A_s = 60\,cm^2$$

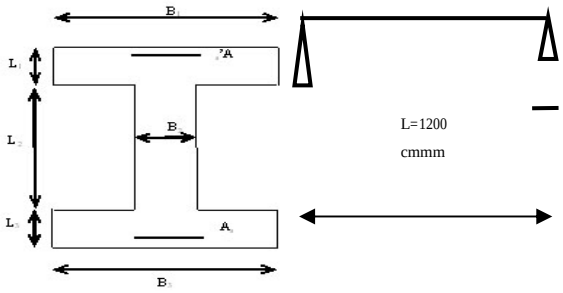
مواصفات المواد:

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

فتحة الجائز : $L = 1200cm$

عمر الخرسانة عند التحميل: $t_0 = 28days$

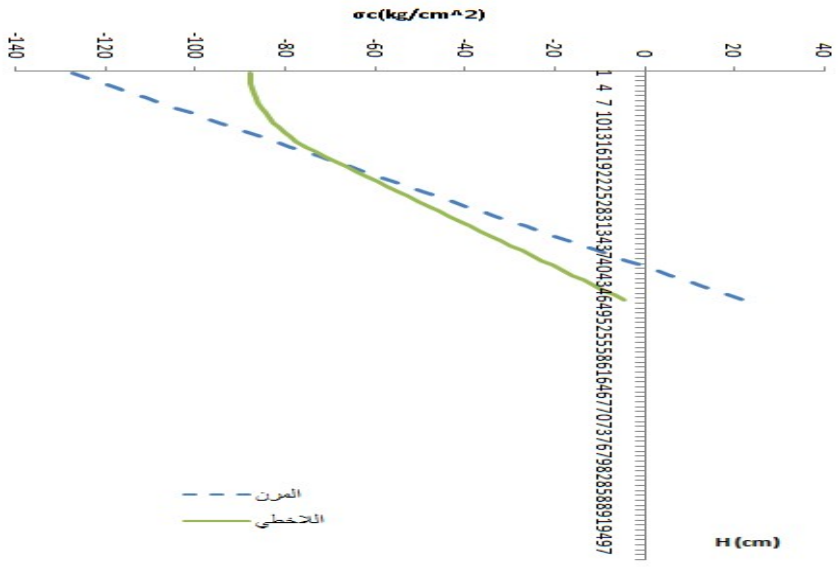
عزم انعطاف دائم : $M = 100\,t.m$



الشكل (13): الجائز المدروس ومقطع عرضي فيه

$B_1 = B_3 = 40\ cm\ , B_2 = 15\ cm\ , H = 100\ cm$
$L_1 = L_3 = 20\ cm\ , L_2 = 60\ cm$
$a' = a = 5\ cm$

يبيّن الشكل (14) تغيّر مخطط الإجهادات من مستقيم مائل في الحالة المرنة إلى مخطط منحني في حالة اللاخطية في اليوم الأول من التحميل، نلاحظ أن الإجهادات في الخرسانة تنخفض في حالة اللاخطية تقريباً إلى $80kg/cm^2$ وهذه الإجهادات قريبة من نسبة الإجهاد إلى المقاومة المساوية إلى 0.4 أي حالة خطية



الشكل(14) الإجهادات في الخرسانة في حال التشوهات اللاخطية

النتائج:

تضمنت هذه الورقة طريقة لتعين تزايد السهوم في الجيزان الخرسانية المسلحة مع الزمن بشكل دقيق، وباعتبار ظاهرتي الزحف والانكماش تحت تأثير العوامل المختلفة من الشروط المحيطية (حجم العنصر، نسبة الماء إلى الاسمنت، نوع الاسمنت، الرطوبة النسبية) سوية الإجهاد، مدة تطبيق التحميل الدائم، عمر الخرسانة عند التحميل وعوامل أخرى، وذلك لتعيين قيم تشوهات الزحف والانكماش التي تؤدي بدورها إلى زيادة السهوم مع الزمن.

يعتمد الأسلوب المقترح للتنبؤ بالسهوم طويلة الأمد في الجيزان الخرسانية المسلحة على إدخال تأثير التشوهات المتعلقة بالزمن (الزحف والانكماش) كذلك تأثير تسليح الضغط، إذْ إنَّ لإضافة تسليح الضغط تأثيراً كبيراً في ضبط السهم طويل الأمد.

كما من الملاحظ أن اللاخطية تؤدي إلى توزع سريع في مخطط الإجهادات حيث تنخفض فيه الاجهادات الكبيرة في منطقة الضغط وينتقل التوزع في الإجهادات من مستقيم إلى منحنى. ومع زيادة الحمولات يقترب مخطط الإجهادات في منطقة الضغط إلى التوزع الثابت (مستطيل) والمعتمد في نظريات الخرسانة منذ عدة عقود.

إن الطريقة المقترحة سهلة الاستخدام ومبرمجة، وتأخذ بالحسبان أغلب العوامل المؤثرة في تغير السهوم مع مرور الزمن، وتعطي نتائج فعالة ودقيقة تنسجم انسجاماً كبيراً مع النتائج المخبرية، وهي تصلح للمقاطع مختلفة الأشكال كلّها المتشققة منها وغير المتشققة، وبمختلف أعمار الخرسانة عند التحميل على عكس الكود الأمريكي (ACI-318R-08) الذي لايميّز بين هذه المقاطع إن كانت متشققة أم لا، ولا يميّز بين أعمار التحميل المختلفة للخرسانة، وهو يعتمد اعتماداً أساسياً على عوامل تجريبية، كما أن هذه الطريقة تدخل تأثير التسليح المضغوط الذي يكبح تزايد السهوم مع الزمن.

لذلك نوصي باستخدام الطريقة المقترحة في هذه الورقة عند حساب السهم (Deflection) في عناصر المنشآت الخرسانية المسلحة نظراً إلى سهولة استخدامها ودقة نتائجها.

المراجع

1. ACI-318R-08 Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08)and Commentary ACI committee318 January 2008
2. ACI 435R-95 Guide Control of Deflection in Concrete Structuresin hardened concrete ACI committee435 Reapproved 2000 Appendix B added 2003
3. ACI209.2R-08 Guide for modeling and calculating shrinkage and creep in hardened concrete ACI committee209 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. Long-term deflections in cracked reinforced concrete flexural members- Antonio R. Mar _, Jes s M. Bair n, Noemi Duarte-Universitat Politècnica de Catalunya, Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona, Spain-2010.
7. Simplified procedures for calculation of instantaneous and long-term deflections of reinforced concrete beams - José Milton de Ara jo- Department of Materials and Construction, University of Rio Grande FURG- Campus Carreiros, Av. It lia, 96203-000, Rio Grande, RS, Brazil-2005.
8. И.И. Улицкий Теория и расчет железобетонных стержневых конструкций с учетом длительных процессов - Издательство "Будивельник" Киев 1967
9. الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت بالخرسانة المسلحة دمشق 2004 نقابة المهندسين الجمهورية العربية السورية الطبعة الثالثة
10. كيفية استخدام طريقة المستقيمين لحساب السهوم في العناصر الخطية الخرسانية المسلحة الخاضعة لأحمال طويلة الأمد(ثابتة ومتزايدة) - الاستاذ الدكتورغسان محمود - مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية - 1997
11. تأثير الزمن على الانحراف في الجوائز الخرسانية المسلحة الدكتور وائل منير صقر - مجلة جامعة الملك عبدالعزيز :العلوم الهندسية، م ١٨ ع ١ -2007

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق 2010/11/14