

الدراسة التجريبية التحليلية لعلاقة

الإجهاد-التشوه للبيتون¹

الدكتور المهندس مأمون سمكري³

المهندسة ريم الكزبري²

الملخص

إن العلاقة بين الإجهاد-التشوه لمادة البيتون تتغير تبعاً لتغير المواد الأولية الداخلة في تركيب الخلطة البيتونية وما دامت هذه المواد هي مواد محلية فلا بد لتحديد ما من إجراء تجارب محلية والوصول من هذه التجارب إلى أداء البيتون الفعلي والذي يمكن اعتباره أقرب للواقع من المخططات المأخوذة من المراجع والمستنتجة من التجارب على بيتون منفذ من مواد أولية قد تختلف في خواصها عن المواد الأولية المحلية. لقد تم في هذا البحث إجراء تجارب محلية في مخبر كلية الهندسة المدنية وذلك بكسر عينات بيتونية منفذة محلياً بمواصفات محددة تحت تأثير حمولات ضغط وفق محور واحد وتسجيل العلاقة بين الإجهاد المطبق والتشوه الناتج لكل مرحلة من مراحل التحميل ابتداءً من بدء التحميل وحتى الانكسار، ومن ثم رسم منحنى مقارب لمخطط الإجهاد-التشوه، هذا وقد تم تنفيذ العينات تبعاً لمجموعة من العوامل مثل (المقاومة المميزة، نسبة الماء إلى الإسمنت، نسبة الحصى إلى الإسمنت) ثم استنتجت علاقة تربط بين الإجهاد-التشوه تمت مقارنتها مع علاقات موجودة في مراجع أجنبية.

¹ أعد هذا البحث في سياق رسالة الماجستير للمهندسة ريم الكزبري بإشراف الدكتور مأمون سمكري.

² قسم الهندسة الإنشائية- كلية الهندسة المدنية- جامعة دمشق.

³ قسم الهندسة الإنشائية- كلية الهندسة المدنية- جامعة دمشق.

1. مقدمة عامة:

من المعلوم أن كل مادة من مواد البناء تتشوه تحت تأثير الحمولات أو الظروف الجوية المحيطة بها، وهذا يعني أن أبعاد عينات المادة تتغير نتيجة ذلك وسوف ندرس في هذا البحث التشوه الذي يؤدي إلى تغيير أبعاد الجسم الأصلية والناجم عن المؤثر الخارجي وهو الحمولات فقط.

يميز عادة بين تشوه مرن يزول بعد زوال السبب وتشوه لدن يبقى بعد إبعاد الحمولات المؤثرة وهناك علاقة وثيقة بين الحمولة المؤثرة وبين التشوه الحاصل تكتب بالشكل:

$$\sigma_i = E_i \cdot \varepsilon_i \dots \dots \dots (1-1) \text{ وهي ما يسمى بقانون هوك.}$$

حيث: σ_i - الإجهادات عند الحمولة F_i .

ε_i - التشوه الناجم عن الإجهاد σ_i عند الحمولة F_i .

E_i - عامل التشوه اللحظي والذي يربط بين الإجهاد المطبق والتشوه الحاصل عند كل تغير في قيمة الحمولة.

ومن العلاقة يتضح بأن عامل التشوه ليس بالضرورة أن يكون ثابتاً وإنما قد تكون له قيمة ثابتة (في المجال المرن للتحميل) وقد تكون له قيمة متغيرة تبعاً لدرجة التحميل (للمواد اللاخطية)، وبناء على ذلك يتم في المواد التي تعمل بشكل لا خطي كالبيتون مثلاً التمييز بين عدة قيم لعامل التشوه أو ما يسمى عامل المرونة وفق المعايير الآتية:

- معامل التشوه المرن المماسي الأولي Initial Tangent Modulus وذلك عند بدء التحميل وحتى درجة من الإجهاد تصل إلى حدود 40% من المقاومة المميزة للبيتون.

- معامل التشوه المماسي اللحظي Tangent Modulus وهو ميل المماس لخط عمل المادة عند نقطة تحميل معينة.

- معامل التشوه الوسطي (القاطع) Secant Modulus وهو ميل المستقيم الواصل بين مبدأ الإحداثيات وبين نقطة ما من خط عمل المادة.

2. هدف البحث:

الهدف من هذا البحث هو تحديد منحني مقارب لمخطط الإجهاد-التشوه للبيتون المنفذ من مواد أولية محلية، وتحديد قيمة معامل المرونة (التشوه) وذلك من خلال إجراء تجارب مخبرية على بيتون منفذ من مواد محلية واستخلاص مخطط العمل له تحت تأثير حمولات الضغط وفق محور واحد.

3. التجارب المنفذة:

1.3. طريقة الدراسة:

نظراً للإمكانيات المتوافرة في مخبر كلية الهندسة المدنية بجامعة دمشق ومخابر البيتون في مدينة دمشق فقد انحصرت الدراسة على تجارب كسر عينات بيتونية منفذة بمواصفات محددة تحت تأثير حمولات الضغط وتسجيل العلاقة بين الإجهاد المطبق والتشوه الناتج لكل مراحل التحميل ابتداءً من بدء التحميل وحتى الانكسار. وقد تم حصر التجارب على الحمولات الستاتيكية السريعة (التحميل من الصفر حتى الانكسار ولكن دون إزالة الحمولة وإعادة التحميل) أي لم يؤخذ بالحسبان التحميل الديناميكي، كما تم تطبيق حمولات ضغط حصرًا دون التطرق إلى حمولات الشد أو تأثير الانعطاف على البيتون إضافة إلى ذلك لم يؤخذ بالحسبان أثر التشوه الحاصل نتيجة التقلص والسيلان خلال فترة إجراء التجربة.

أما العوامل المتغيرة التي درست فهي:

أ.نسبة الماء إلى الإسمنت w/c

ب.كمية الإسمنت في الخلطة (نسبة الحصويات إلى الأسمنت Agg/c)

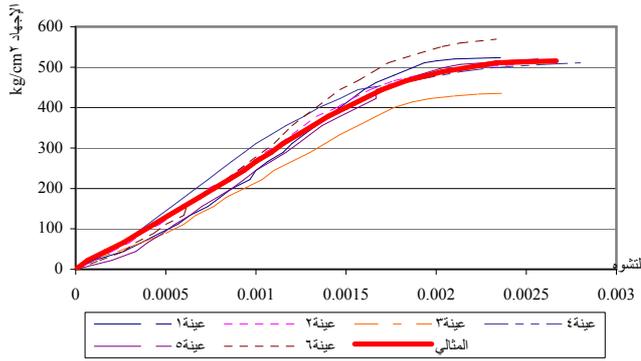
2.3. عرض مراحل العمل:

استخدم الإسمنت الوطني إنتاج معمل إسمنت عدرا وتم إحضار الحصويات من محافظة ريف دمشق (كسارات حفير) وأجريت عليها اختبارات التدرج الحبي وتحديد نسبة الغضار وتعيين الوزن النوعي والوزن الحجمي إضافة إلى تحديد نسبة الرطوبة،

أما أجهزة القياس المستخدمة في البحث فهي جهاز مكبس كسر العينات و جهاز قياس التشوه.

3.3. شرح نتيجة إحدى التجارب:

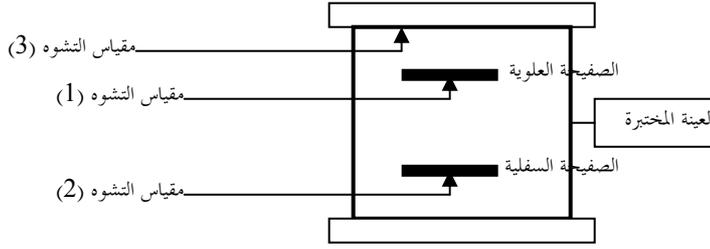
بعد معايرة الأجهزة ومعايرة طرائق البحث تم إجراء التجارب على مجموعات من العينات بحيث يكون لكل مجموعة مواصفة معينة (تتعلق بنسبة الماء إلى الإسمنت- نسبة الحصى إلى الإسمنت- كمية الإسمنت المستخدمة- المقاومة المميزة) تتألف كل مجموعة من ست عينات تم تسجيل قيم الحمولات والتشوهات لها خلال إجراء التجربة، كما تم تنظيم جداول لحساب الإجهاد الناجم عن الحمولة المطبقة والتشوه الناتج عن تطبيق هذه الحمولة، ومن ثم حساب عامل التشوه اللحظي لكل نقطة على حدة، وبعد حساب الإجهاد والتشوه تم رسم مخطط الإجهاد-التشوه لكل عينة من العينات الست المختبرة ومن ثم رسم منحنى يمثل هذه العينات سميناه المنحنى الوسطي ويوضح الشكل (1-3) مخطط الإجهاد-التشوه لست عينات ومخطط المنحنى الوسطي المستنتج وذلك من أجل $w/c=0.45$ و $Agg/c=3.8$ أي من أجل $C=460$ kg للمتر المكعب حيث كانت المقاومة المميزة الأسطوانية للبيتون الناتج مساوية 412kg/cm^2



الشكل (1-3) مخطط الإجهاد-التشوه لست عينات لها المواصفات نفسها والمخطط المنحنى الوسطي لها

4.3. معايرة تجهيزات التجربة مع الكود الأمريكي ASTM:

نظراً لعدم توافر مواصفات محلية تحدد شروط إجراء تجربة العلاقة بين الإجهاد- التشوه أو حتى عن تجربة عامل المرونة فقد تمت مقارنة طريقة إجراء التجربة مع ما هو وارد في الكود الأمريكي والذي ينص على تثبيت صفيحتين معدنيتين إحداهما قريبة من الحافة السفلية للعينة والأخرى من الحافة العلوية للعينة، وبحيث تكون المسافة بين الصفيحتين أكبر من ثلاثة أضعاف القياس الأعظمي للحصويات الداخلة في تركيب العينة البيتونية ولا تزيد على ثلثي ارتفاع العينة والطول المفضل هو نصف ارتفاع العينة [1]. وقد تم عملياً إجراء تجارب البحث بتثبيت عزمة على بعد 2.5cm من أعلى العينة وأخرى على بعد 2.5cm من أسفل العينة وذلك بواسطة مادة الإيبوكسي وقد تمت الاستعانة بصفيحة معدنية ملحومة مع برغي لتثبيت رأس مقياس التشوه عند هذه النقطة المدروسة من العينة، وبحيث أصبح الطول الفعال بين الصفيحتين 10cm، بعد ذلك تم تثبيت مقاييس التشوه (الأول عند الصفيحة العلوية والثاني عند الصفيحة السفلية والثالث عند أعلى العينة)، وقد أخذت قراءة المؤشرات (القوة والانتقال) في أثناء إجراء التجربة، هذا وقد لوحظ أن قيم التشوه الحاصل نتيجة إجهاد معين عند أعلى العينة تساوي قيم التشوه بين الصفيحتين وذلك بسبب أن فرق القياس بينهما صغير جداً ويضيع في دقة أجهزة القياس المتوافرة والتي استخدمت في البحث حيث لم يكن بالإمكان الحصول على دقة أكبر في قياسات التجارب المنفذة ومن ثمَّ وبسبب صعوبات في إجراء التجربة ونتيجة تساوي قيم التشوهات الناتجة في أعلى العينة والتشوهات بين الصفيحتين المعدنيتين تم الاستغناء عن تثبيت الصفيحتين في وسط العينة والاكتفاء بقراءة التشوه في أعلى العينة.



الشكل (2-3) وضعية مقاييس التشوه بالنسبة للعينة ولجهاز الضغط

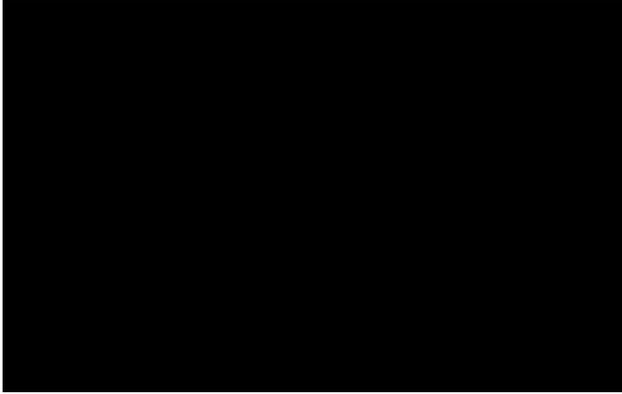
4. عرض نتائج البحث وتحليلها

1.4 مخطط الإجهاد-التشوه المستنتج

يمكن التمييز بين المخططات المستنتجة وتصنيفها تبعاً لتغير نسبة الماء إلى الاسمنت ولتغير نسبة الحصى إلى الاسمنت.

1.1.4 تأثير نسبة الماء إلى الاسمنت:

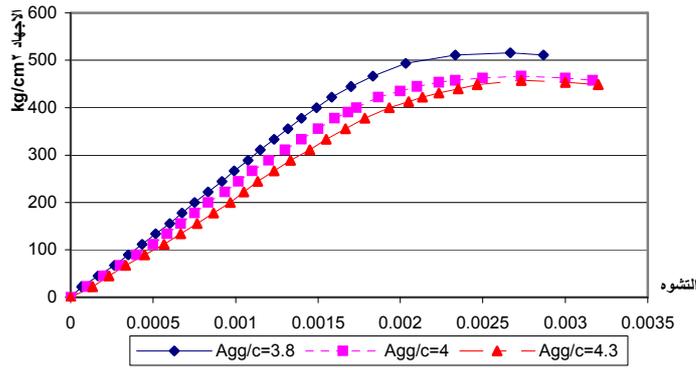
تم تثبيت نسبة الحصى إلى الاسمنت Agg/c من أجل النسب الوزنية: 4.0- 3.8- 4.3، وتغيير نسبة الماء إلى الاسمنت w/c وفق قيم مختلفة وقد تم رسم المنحنى الوسطي لكل تغير من هذه التغيرات على مخطط واحد، والشكل (1-4) يوضح تغير مخطط الإجهاد-التشوه لعينات مختلفة من أجل $Agg/c=3.8$.



الشكل (1-4) المنحنيات الوسطية لمجموعة من العينات من أجل $Agg/c=3.8$

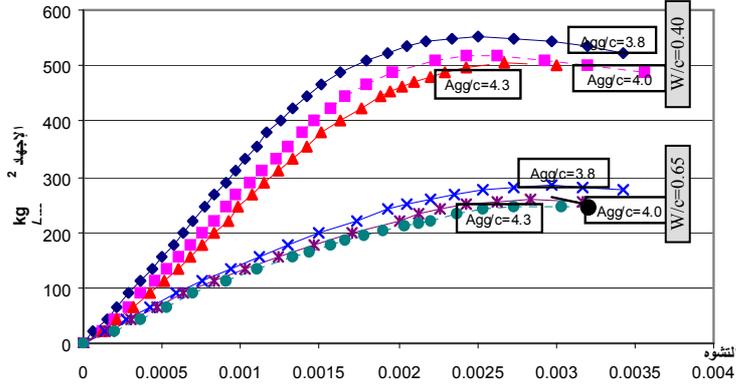
2.1.4. تأثير نسبة الحصى إلى الإسمنت:

تم تثبيت نسبة الماء إلى الإسمنت w/c من أجل القيم: 0.40- 0.45- 0.50- 0.55- 0.60- 0.65- 0.70- 0.75، وتغيير نسبة الحصى إلى الإسمنت Agg/c وفق قيم مختلفة، وقد تم رسم المنحنى الوسطي لكل تغيير من هذه التغييرات على مخطط واحد والشكل (2-4) يوضح تغير مخطط الإجهاد-التشوه لعينات مختلفة من أجل $w/c=0.45$.



الشكل (2-4) المنحنيات الوسطية لمجموعة من العينات من أجل $w/c=0.45$

هذا ويمكن مقارنة المنحنيات الوسطية لمخطط الإجهاد-التشوه بين قيمتين مختلفتين w/c ولتكن مثلاً من أجل $w/c=0.40$ و $w/c=0.65$ وذلك لملاحظة الفروق كما هو موضح بالشكل (3-4).



الشكل (3-4) المنحنيات الوسطية من أجل $w/c=0.65$ و $w/c=0.40$

2.4. التمييز بين القيم المختلفة لعامل التشوه:

من أجل أحد المنحنيات الوسطية المستنتجة من التجارب تم حساب القيم المختلفة لعوامل التشوه وهي:

$$E_i = \frac{\sigma_i}{\epsilon_i} \dots \dots \dots (1-4) \quad \text{عامل التشوه الوسطي [القاطع]}$$

حيث: E_i - عامل المرونة (التشوه) القاطع عند كل نقطة قياس.

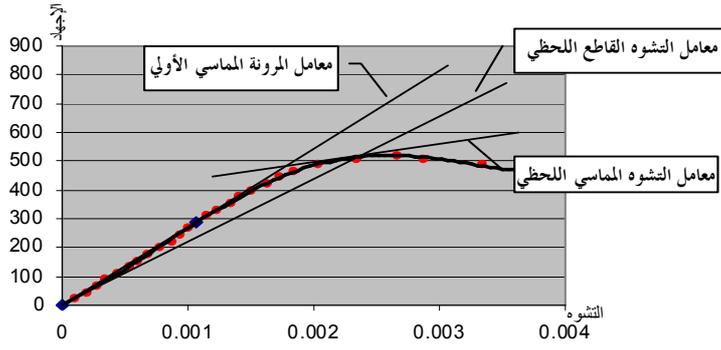
σ_i - الإجهاد عند لحظة معينة.

ϵ_i - التشوه عند لحظة معينة.

عامل التشوه المماسي اللحظي والذي يمثل ميل المماس عند لحظة معينة

عامل المرونة المماسي الأولي وهو ميل المماس عند بدء التحميل

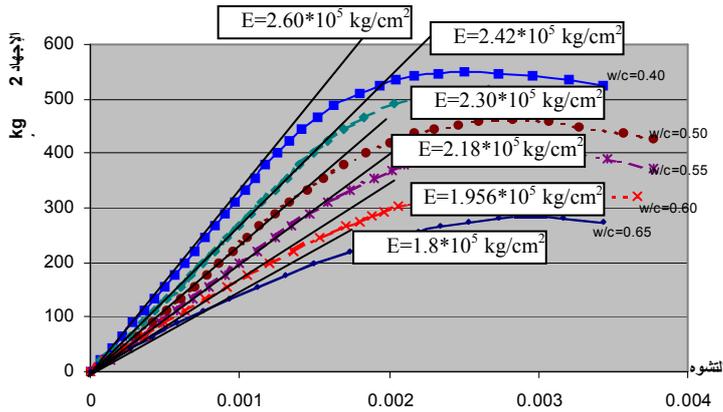
ويوضح الشكل (4-4) الفروق بين معاملات التشوه الثلاث.



الشكل (4-4) معاملات التشوه الثلاث (المماسي الأولي، اللحظي المماسي، اللحظي القاطع)

وقد لوحظ أن عامل التشوه اللحظي القاطع في مراحل التحميل البدائية الأولى عند (5-10% من إجهاد الانكسار) غير دقيق ويمكن استبعاده على اعتبار أن أداء البيتون في هذه المرحلة خطي، ثم لا يلبث أن يأخذ قيمةً متقاربةً وهي التي تمثل المرحلة الخطية الفعلية لمخطط الإجهاد-التشوه، في حين نلاحظ اختلاف قيم عامل التشوه المماسي اللحظي مع اختلاف ميل المماس عند لحظة معينة والذي يأخذ قيمةً متناقصةً بالقرب من مرحلة الانهيار أما عامل المرونة المماسي الأولي فقيمته ثابتة على كامل المنحني.

هذا ويمكن مقارنة قيم معاملات المرونة الأولية المماسية لمجموعة من المنحنيات والتي تظهر زيادة قيمة عامل المرونة كلما قلت نسبة الماء إلى الإسمنت ويوضح ذلك الشكل (4-5).



الشكل (5-4) مقارنة بين قيم معاملات المرونة المماسية الأولية تبعاً للنسبة w/c

3.4. مقارنة نتائج البحث مع نتائج تجارب مماثلة:

لتوثيق نتائج البحث ومقارنته مع ما هو وارد في البحوث والمراجع تم استخدام العلاقة التي وضعت من قبل (Park & Paulay (1975) [2] والذي يربط فيه بين الإجهاد

$$\text{والتشوه بالعلاقة (2-4): } \frac{\sigma_c}{f_c} = 2 \left[\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \right] - \left[\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \right]^2 \quad (2-4) \dots \dots \dots$$

حيث:

σ_c - الإجهاد عند نقطة معينة من مخطط الإجهاد-التشوه.

f_c - الإجهاد الأعظمي في مخطط الإجهاد-التشوه المدروس.

ϵ_c - التشوه عند النقطة نفسها من مخطط الإجهاد-التشوه التي قيس عندها الإجهاد.

$$\epsilon_{c1} - يعطى بالعلاقة: \epsilon_{c1} = \frac{f_c}{E_o} \quad (3-4) \dots \dots \dots$$

حيث:

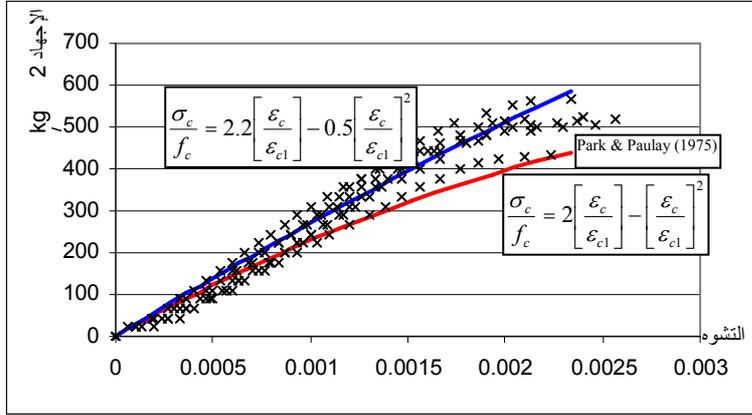
f_c - الإجهاد الأعظمي في مخطط الإجهاد-التشوه المدروس.

E_o - عامل التشوه المماسي الأولي المرن لمخطط الإجهاد-التشوه المدروس.

إلا أن مقارنة نتيجة هذه العلاقة مع النتائج والحسابات ومخططات الإجهاد-التشوه المستنتجة أظهرت وجود اختلاف في المعاملات الداخلة في هذه العلاقة حيث إن

العلاقة المستنتجة من البحث هي:
$$\frac{\sigma_c}{f_c} = 2.2 \left[\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \right] - 0.5 \left[\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \right]^2$$
(4-4)

والشكل (6-4) يوضح هذه الفروقات مع التمييز بين المنحنيين.



الشكل (6-4) مقارنة العلاقة التي تربط بين الإجهاد-التشوه المستنتجة من البحث مع علاقة Park&Paulay

5. الاستنتاجات:

من خلال التجارب التي عرضت في متن البحث يمكن تثبيت الاستنتاجات الآتية:

- أكدت التجارب أن مخطط الإجهاد - التشوه للبيتون المحضّر من مواد محلية يتعلّق بالعوامل ذاتها المؤثرة في مقاومة البيتون حيث يتغير شكل المخطط تبعاً لنسبة الماء إلى الإسمنت w/c ولكمية الإسمنت الداخلة في الخلطة حيث يصبح مخطط الإجهاد-التشوه محدباً بشكل واضح عندما تتناقص نسبة الماء إلى الإسمنت، في حين يصبح قليل التحذب وأقرب للمستقيم المائل كلما ازدادت نسبة الماء إلى الإسمنت.

- وينطبق هذا الأمر تماماً على زيادة كمية الإسمنت حيث تقل قيمة التشوهات التي يتعرض لها البيتون عند إجهاد معين مع زيادة كمية الإسمنت الداخلة في تركيب الخلطة البيتونية.
- يمكن من خلال مخططات الإجهاد-التشوه التي تم استنتاجها تحديد عامل مرونة للبيتون، وبالطبع فإن قيمة عامل المرونة هذا ستتبع تغير شكل مخطط الإجهاد - التشوه (σ-ε).
- إن رسم مخططات الإجهاد-التشوه (σ-ε) المستنتجة تجريبياً يمكن تمثيلها بالعلاقة:

$$\frac{\sigma_c}{f_c} = 2.2 \left[\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right] - 0.5 \left[\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right]^2$$

حيث:

σc- الإجهاد عند نقطة معينة في مخطط الإجهاد-التشوه.

fc- الإجهاد الأعظمي في مخطط الإجهاد-التشوه.

εc- التشوه عند نقطة معينة في مخطط الإجهاد-التشوه.

$$\varepsilon_{c1} = 2 \frac{f_c}{E_0} \quad \text{يعطى بالعلاقة:}$$

حيث: E0- عامل المرونة المماسي الأولي.

وهذه العلاقة تعطي قيماً قريبة جداً من القيم التي تم الحصول عليها تجريبياً، ومن ثمّ فإنه يمكن في الحسابات العملية وفق طريقة العناصر المحدودة اعتماد العلاقة السابقة في حال حساب عناصر بيتونية معرضة لإجهادات ضاغطة باتجاه واحد (وفي مجال منطقة الضغط فقط) وهذا بالطبع أقرب إلى الواقع من اعتبار البيتون مادة مرنة في أثناء الحسابات.

6. التوصيات:

- إن نتائج البحث هي نتائج معتمدة على العديد من العوامل أهمها الأجهزة التي استخدمت سواء كانت أجهزة تحضير أو قياس أو كسر، ومن ثم فإن دقة النتائج كانت معتمدة على دقة التجهيزات المستخدمة، ولا بد من أخذ ذلك بالحسبان عند استخدام نتائج البحث.
- كذلك فإن العلاقة المقترحة للربط بين الإجهاد-التشوه مع المقاومة المميزة هي ذات دقة من دقة الأجهزة المستخدمة نفسها ولا بد من أخذ ذلك في الحسبان عند استخدامها.
- يجب في المشاريع الكبيرة والمهمة وقبل البدء بتنفيذ عناصرها البيتونية إجراء تجارب مخبرية على الحصويات التي ستستخدم واستنتاج مخطط الإجهاد-التشوه وعامل المرونة لها ومقارنة هذه القيم مع القيم التصميمية حتى تكون نتيجة التنفيذ مطابقة لما هي وفق التصميم والحسابات وخاصة في العناصر الإنشائية المحسوبة وفق الطرائق المبرمجة كطريقة العناصر المحدودة وذلك كي نحصل على نتيجة يمكن تحديدها وتبريرها علمياً.

المراجع

- [1] ASTM, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.
- [2] Park, R. and Paulay, T., Reinforced Concrete Structures, J. Wiley & Sons, Inc.
- [3] Sabins, G. M. and Harris, H. G. and White, R. N., Mirza, M. S., Structural Modeling and Experimental Techniques, Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, N. J. 07632, U.S.A., 1983.
- [4] Anthony Hoadley, Essential of Structure Design, John Wiley & Sons, Inc.
- [5] Paul F. Rice, Structure Design Guide to the ACI Building Code (Second Edition), Edward S. Hoffman, 1979.
- [6] د. راتب رزوق، د. وهيب زين الدين، تكنولوجيا البيتون المسلح، جامعة دمشق، مديرية الكتب، 1986.
- [7] د. أحمد علي العريان، د. عبد الكريم محمد عطا، تكنولوجيا الخرسانة (خواص الخرسانة وتصميم خلطاتها / الجزء الثاني)، عالم الكتب القاهرة، 1975.

محتويات البحث

1.....	1. مقدمة عامة
1.....	2. هدف البحث
2.....	3. التجارب المنفذة
2.....	1.3. طريقة الدراسة
2.....	2.3. عرض مراحل العمل
2.....	3.3. شرح نتيجة إحدى التجارب
3.....	4.3. معايرة التجربة مع الكود الأمريكي ASTM
4.....	4. عرض نتائج البحث وتحليلها
4.....	1.4. مخطط الإجهاد-التشوه المستنتج
4.....	1.1.4. تأثير نسبة الماء إلى الاسمنت
5.....	2.1.4. تأثير نسبة الحصى إلى الاسمنت
6.....	2.4. التمييز بين القيم المختلفة لعامل المرونة
8.....	3.4. مقارنة نتائج البحث مع نتائج تجارب مماثلة
9.....	5. الاستنتاجات
10.....	6. التوصيات
11.....	المراجع

تاريخ ورود البحث إلى جامعة دمشق: 2002/4/5.