

## دراسة في العوامل المؤثرة في مطاوعة الانحناء لجدران القص البيتونية المسلحة

\*الدكتور حافظ الصادق

### الملخص

يعدُّ تأمين المطاوعة في الجمل الإنشائية المقاومة للزلازل عاملاً رئيسياً في تبرير تخفيض القوى الزلزالية التي تصمم عليها هذه الجمل، و تعدُّ جدران القص من أهم الجمل المستخدمة في تأمين المقاومة الزلزالية للأبنية. دُرِسَتْ في هذا البحث عدة عوامل يمكن أن تؤثر في مطاوعة الانحناء لمقاطع جدران القص وهذه العوامل هي توزع التسليح ونسبته في حالتي التسليح المنتظم والمركز في النهايتين وشدة الأحمال الناظمية المطبقة على الجدران وطول مقطع الجدار وخواص مواد الإنشاء. تبين النتائج أنه مع زيادة نسبة التسليح، تنخفض المطاوعة في جدران القص، ذات التسليح المنتظم ولكنها تبقى مستقرة في حالة التسليح المركز في النهايتين. أما تأثير شدة الحمولة الناظمية، فإن مطاوعة الانحناء تقل مع زيادة هذه الحمولة وتكاد تنعدم عندما تزيد الحمولة الناظمية على نصف الحمولة الناظمية القصوى المسموح تطبيقها.

الكلمات المفتاحية: المخططات التنظيمية - تخطيط مدينة حمص

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

## 1- مقدمة

تعتمد معظم مباني البيتون المسلح التي تصمم في سورية على جدران القص في مقاومة الأحمال الزلزالية على الرغم من الكلفة الكبرى الناتجة عن عامل تخفيض حمولة أقل مقارنة بالجمل الإنشائية الأخرى مثل الجمل الثنائية المؤلف من جدران قص وإطارات مقاومة للعزوم أو جمل الإطارات المقاومة للعزوم وحدها. في معظم الحالات ترافق جدران القص جملة إطارية تكون مسؤوليتها مقاومة الأحمال الشاقولية فقط، ومع ذلك تطبق عليها اشتراطات الإطارات العادية بالنسبة إلى تفاصيل التسليح، ولاسيما في نهايات العناصر من أعمدة وجوائز.

نظراً إلى هذا الاعتماد المهم على جدران القص في مقاومة الأحمال الزلزالية، فإن الحاجة تزداد لدراسة العوامل التي تتحكم بمطاوعتها؛ وذلك لأهمية هذه المطاوعة في تبديد الطاقة الزلزالية<sup>1</sup>، والحفاظ على معظم مقاومة المنشأ سواء للأحمال الجانبية أو الشاقولية، إذ إن معظم جدران القص تسهم في تحمل الأحمال الشاقولية فضلاً عن وظيفتها الرئيسية في مقاومة الأحمال الجانبية.

تجرى في هذا البحث دراسة تحليلية تشمل بعض العوامل ذات علاقة بمطاوعة جدران القص من خلال دراسة العلاقة بين عزم الانعطاف والانحناء (bending moment vs. curvature) لمقطع جدران القص، ومن ثم استخراج مطاوعة الانحناء (curvature ductility). سيتم تناول تأثير العوامل التالية في مطاوعة جدران القص: تأثير نسبة وتوزيع نسبة التسليح، تأثير شدة الأحمال الناظمية، وتأثير خواص مواد الإنشاء.

حتى يُنشأ مخطط العلاقة بين عزم الانعطاف والانحناء لمقطع جدار القص، يجب تحديد العلاقة بين

إجهاد الضغط والانفعال في البيتون والعلاقة بين الإجهاد والانفعال لفولاذ التسليح، وأيضاً اعتماد أحد الكودات الهندسية. وقد اختير في هذا البحث الكود الأمريكي الموحد<sup>2</sup>(UBC97) كونه مرجعاً أساسياً للكود العربي السوري<sup>3</sup>.

## 2- خواص البيتون والفولاذ

بالنسبة إلى العلاقة بين الإجهاد والانفعال في البيتون، اعتمد النموذج التالي<sup>4</sup>: من أجل انفعال أكبر من  $\epsilon_0$  تكون العلاقة خطية، ومن أجل انفعال أصغر من  $\epsilon_0$  تكون العلاقة عبارة عن منحنى قطعي من الدرجة الثانية. تعطى  $\epsilon_0$  بالعلاقة

$$\epsilon_0 = 2 \frac{f'_c}{E_c} \quad (1)$$

من أجل  $\epsilon < \epsilon_0$  تعطى الإجهادات بالبيتون بالعلاقة

$$\sigma = \left[ 2 \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right] f'_c \quad (2)$$

من أجل  $\epsilon < \epsilon_0$  يتم تقريب المنحنى إلى سلسلة من القطع المستقيمة وتحسب  $\sigma$  من العلاقة (2) عند قيم انفعالات: 0، 0.2 $\epsilon_0$ ، 0.4 $\epsilon_0$ ، 0.6 $\epsilon_0$ ، 0.8 $\epsilon_0$ ، 0.9 $\epsilon_0$ ،  $\epsilon_0$ . في المجال من  $\epsilon_0$  وحتى 4 $\epsilon_0$

العلاقة خطية حيث تتناقص مقاومة بيتون من  $f'_c$  إلى 0.2 $f'_c$ ، ثم تستمر هذه المقاومة حتى الانهيار عند انفعال  $\epsilon = 10\epsilon_0$ ، وعندما يكون هناك انفعال شد فإن الإجهاد يساوي الصفر.

أما العلاقة بين الإجهاد والانفعال في فولاذ التسليح فقد اعتمدت العلاقة نفسها بالنسبة إلى كل من إجهادات الشد والضغط<sup>4</sup>. يحدد  $f_y$  وفق نوع الفولاذ وتحدد العلاقة بين إجهاد الخضوع  $f_y$  والإجهاد الأقصى ( $f_u$ ) للفولاذ بـ  $f_u = 1.25f_y$ . يحسب انفعال الخضوع بالعلاقة

## 3- حساب مطاوعة الانحناء لجدار قص

إن انحناء مقطع جدار قص،  $\phi$ ، معرض لقوة ناظرية وعزم انعطاف يساوي ميل مخطط الانفعال على طول المقطع. إذا فرضنا أن انفعال البيتون الأعظمي  $\epsilon_c$  والانفعال الأعظمي في فولاذ التسليح  $\epsilon_s$  وأن المسافة بين أقصى ليف مضغوط وأبعد مركز قضيب تسليح مشدود هو  $d'$ ، يمكن حساب انحناء مقطع جدار القص من العلاقة (4)،

$$\phi = \frac{\epsilon_s + \epsilon_c}{d'} \quad (4)$$

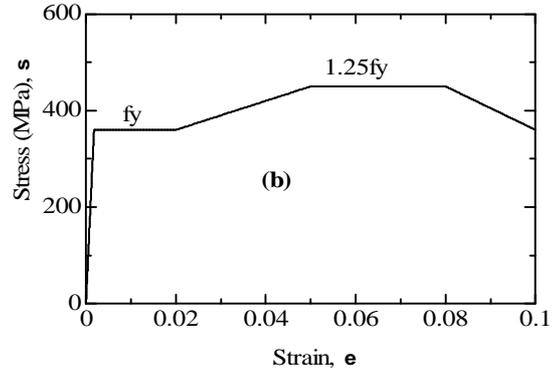
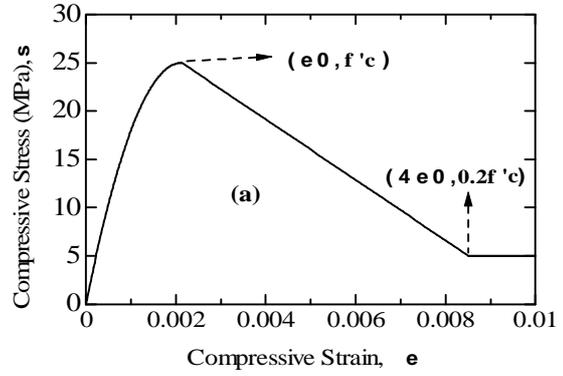
يُرسَمُ منحنى عزم الانعطاف - الانحناء من أجل قوة ناظرية محددة. يمكن اختيار العدد الأعظمي المرغوب فيه من النقاط لرسم هذا المنحنى. وفي هذا البحث اختيرت 11 نقطة لكل منحنى، كما يجب تحديد الانحناء الأعظمي المطلوب التوقف عنده، ويمكن افتراضه مساوياً إلى الانحناء الذي يحدث عنده انهيار قضيب تسليح يبعد  $y$  عن مركز ثقل المقطع. بفرض  $\phi_f$  انحناء الانهيار للقضيب و  $(\epsilon_s)_f$  هو انفعال الانهيار للقضيب، عندها تحسب  $\phi_f$  من العلاقة

$$\phi_f = \frac{(\epsilon_s)_f}{y} \quad (5)$$

اختيرت القضبان الأبعد عن مركز ثقل المقطع بحيث نحصل على أصغر قيمة لانحناء الانهيار. يبيّن الشكل (2) منحنى نموذجياً للعلاقة بين عزم الانعطاف والانحناء. عادة يتم تقريب منحنى عزم الانعطاف - الانحناء إلى منحنى ثنائي الخطية (bilinear). بفرض  $M_y$  عزم الانعطاف عند الخضوع و  $\phi_y$  انحناء الخضوع و  $\phi_m$  الانحناء الأعظمي، بحيث نحصل على أفضل

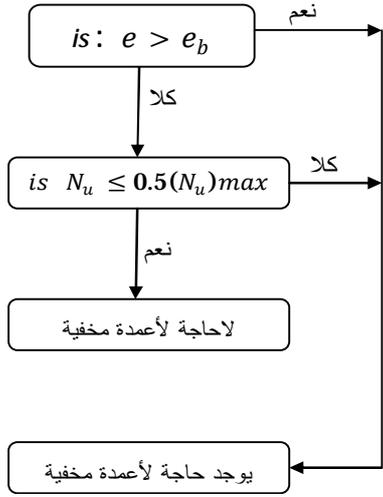
$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \quad (3)$$

يستمر الفولاذ عند مقاومة تساوي إجهاد الخضوع حتى الانفعال 0.02، بعدها يستعيد الفولاذ جزءاً من صلابته (hardening)، وتزيد مقاومته وصولاً إلى المقاومة القصوى  $f_u$  عند  $\epsilon = 0.05$ ، وتستمر هذه المقاومة حتى  $\epsilon = 0.08$ ، ثم تتراجع مقاومة الفولاذ بحدّة ويحدث الانهيار  $\epsilon = 0.1$ .



الشكل (1) علاقة  $(\sigma, \epsilon)$  للبيتون (a) والفولاذ (b)

يبيّن الشكل (1a) مخطط العلاقة بين الإجهاد والانفعال للبيتون، كما يبيّن الشكل (1b) هذه العلاقة بالنسبة إلى الفولاذ، وقد استخرجت المنحنيات من أجل  $f'_c = 25 \text{ MPa}$  و  $f_y = 360 \text{ MPa}$ .



الشكل (3) مخطط يبين الحاجة لأعمدة المخفية في جدران القص وفق الكود العربي السوري

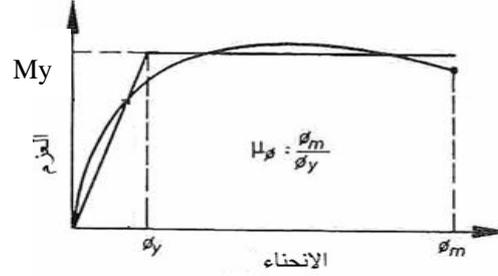
تزداد هذه النسبة الدنيا بشكل خطي إلى أن تصل إلى 0.6 % من المقطع الفعلي للجدار عندما تصل القوة الحدية القصوى المعرض لها الجدار إلى القوة العظمى  $(N_u)_{max}$ ، في الحالات التي يكون فيها الجدار معرضاً لضغط بلامركية صغيرة في حالة الحد الأقصى. 2- في حال تجاوزت قوة الضغط في حالة الحد الأقصى في المقطع الحرج نصف المقاومة القصوى في الضغط لهذا الجدار، توضع في هذه الحالة أعمدة مخفية عند نهايات الجدار سماكتها  $t$  وطول مقطعها  $2t$  كحد أدنى وبطول أعظمي  $0.2L$  إذ  $L$  طول الجدار، ويستعمل في هذه الأعمدة تسليح طولي نسبته 1- 2.5%. إذا كان جدار القص في حالة الحد الأقصى معرضاً إلى ضغط بلامركية كبيرة، يحسب التسليح اللازم للشد ويركز في عمود مخفي وفق اشتراطات الأبعاد والتسليح الواردة أعلاه نفسها.

#### 5- تأثير نسبة التسليح وتوزعه:

من أجل دراسة تأثير نسبة التسليح وتوزعه في جدران القص في المطاوعة دُرست حالتا التسليح المنتظم والتسليح المركز في النهايتين مع وجود تسليح إنشائي بينهما. اختبر بيتون مقاومته المميزة على الضغط

تقريب للمنحنى الفعلي إلى منحنى ثنائي الخطية، وعندها تحسب مطاوعة الانحناء من العلاقة:

$$\frac{\mu_0}{\phi_y} = \frac{\phi_m}{\phi_y} \quad (6)$$



الشكل (2) شكل تخطيطي يبين كيفية حساب  $\mu_0$

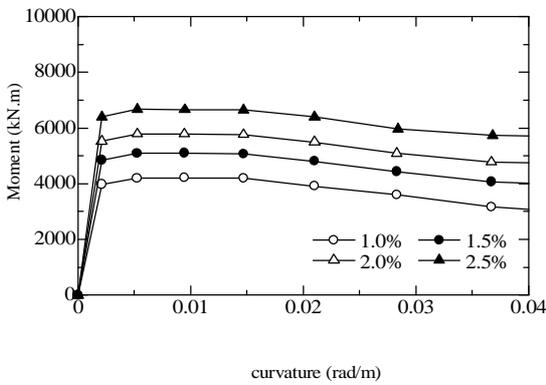
#### 4- تسليح جدران القص في الكود السوري

يوضح الشكل (3) ملخصاً لكيفية اختيار طريقة تسليح جدران القص وفق الكود العربي السوري<sup>3</sup>. تحسب اللامركزية التي يتعرض لها الجدار،  $e$  وتقارن باللامركزية التوازنية  $e_b$ ، فإذا كانت  $e$  أقل من  $e_b$  عدت صغيرة، وإذا كانت  $e$  أكبر من  $e_b$  عدت كبيرة. إذا كانت اللامركزية صغيرة فيمكن تمييز الحالتين: 1- لا تتجاوز قوة الضغط في حالة الحد الأقصى في المقطع الحرج لجدار القص نصف المقاومة القصوى في الضغط لهذا الجدار. يمكن في هذه الحالة الاستغناء عن وضع أعمدة مخفية في نهايات الجدران، وفي هذه الحالة يكون تسليح جدار القص منتظماً (uniform reinforcement)، وتكون نسبة التسليح الدنيا 0.2% للفولاذ عالي المقاومة، وذلك عندما لا تزيد القوة الحدية القصوى المعرض لها الجدار  $N_u$  على نصف القوة الناظمية العظمى  $(N_u)_{max}$  المسموح تطبيقها على الجدار محسوبة من العلاقة،

$$(N_u)_{max} = 0.8\Omega[0.85f'_c(Ag - As) + f_y] \quad (7)$$

إذ  $\Omega$  عامل تخفيض المقاومة على الضغط و  $Ag$  المساحة الكلية للمقطع البيتوني و  $As$  مساحة مقطع قضبان التسليح.

درست أيضاً حالة التسليح المركز في النهايتين (أعمدة مخفية)، وقد درست جدران قص بأربع حالات لنسبة التسليح في الأعمدة المخفية، وهي 1%، 1.5%، 2.0% و 2.5%. في حين وضع تسليح بقيمته الدنيا وهي 0.2% للمنطقة بين العمودين المخفيين للحالات كلها. هذا وقد طبقت حمولة ناظرية تعادل 10% من الحمولة العظمى المسموح تطبيقها.

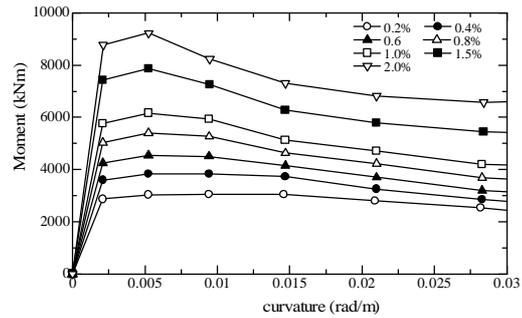


الشكل (5) علاقة العزم بالانحناء - تسليح مركز في النهايتين

يلاحظ من الشكل (5) أن المطاوعة بقيت ثابتة تقريباً لنسب التسليح كلها، وتعادل 4.5، كما أن المقاومة تتناقص بمعدل أقل في حالة التسليح المركز مقارنة بالتسليح المنتظم.

وبغية دراسة تأثير تغير أبعاد العمود المخفي في منحنى العلاقة بين عزم الانعطاف والانحناء ومن ثم المطاوعة، درست حالة جدران قص بطول 6م وسماكة 0.3م وأربع حالات لتغير طول العمود المخفي وهي: 0.6، 0.8، 1.0، 1.2م وقد سلحت الأعمدة بتسليح نسبته 1% والجزء بين العمودين المخفيين بنسبة تسليح 0.2%، وقد حمل الجدار بحمولة ناظرية تساوي 10% من الحمولة الأعظمية التي يستطيع تحملها في كل حالة. يبين الشكل (6) المنحنيات في الحالات الأربع. يلاحظ من الشكل أن قيم مطاوعة الانحناء لم تتغير تقريباً وهي تساوي 10

كما اختير فولاذ تسليح إجهاد خضوعه  $f_c = 25\text{MPa}$ ،  $f_y = 360\text{MPa}$ . يحسب معامل مرونة البيتون من العلاقة  $E_c = 4700\sqrt{f_c}$  إذ  $E_c$ ،  $f_c$  بوحدة (MPa)، كما اعتمد معامل المرونة للفولاذ  $E_s = 2 \times 10^5$  MPa. اختير جدار قص بطول 3م وسماكة 0.3م وباستخدام تسليح منتظم أولاً حيث رسمت منحنيات العلاقة بين عزم الانعطاف والانحناء لعدة نسب تسليح، وهي: 0.2%، 0.4%، 0.6%، 0.8%، 1.0% وقد كانت القوة الناظرية المطبقة تساوي الصفر. يبين الشكل (4) هذه المنحنيات لحالة التسليح المنتظم، كما يلخص الجدول (1) حساب المطاوعة لمختلف نسب التسليح.



الشكل (4) منحنيات عزم الانعطاف- الانحناء، تسليح منتظم

يلاحظ من الشكل (4) والجدول (1) أنه مع زيادة نسبة التسليح تتناقص مطاوعة الانحناء. كما يلاحظ أن معدل انخفاض المقاومة يزداد بعد وصول العزم المقاوم إلى قيمته الأعظمية مع زيادة نسبة التسليح.

الجدول (1) قيم المطاوعة في حالة التسليح المنتظم

case No.	Reinf. Ratio %	phi-y	phi-u	duc
1	0.2	0.00209	0.01907	9.1
2	0.4	0.00209	0.01628	7.8
3	0.6	0.00209	0.01348	6.4
4	0.8	0.00209	0.01167	5.6
5	1	0.00209	0.01069	5.1
6	1.5	0.00209	0.00883	4.2
7	2	0.00209	0.00696	3.3

مطاوعة الانحناء عند كل قيمة للعامل  $r$ . يبين هذا الجدول أن المطاوعة تتناقص بسرعة مع زيادة قيمة  $r$ ، وقد لا نحصل على أية مطاوعة عندما تصل النسبة إلى  $r=0.5$ .

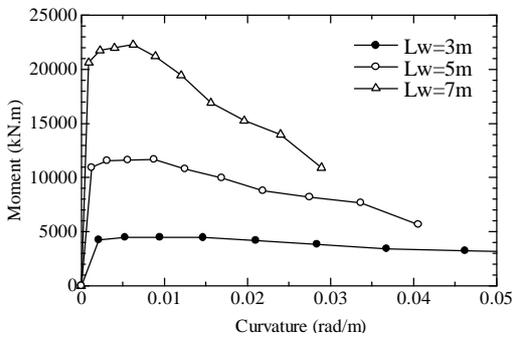
الجدول (2) قيم مطاوعة الانحناء- تأثير الأحمال الناظمية

r	phi-1	phi-2	duc	strength(kNm)
0	0.0021	0.0367	17.5	1800.0
0.1	0.0021	0.0147	7.0	3716.0
0.2	0.0021	0.0094	4.5	5386.0
0.35	0.0021	0.0052	2.5	7348.0
0.5	0.0021	-	-	8418.0

لذلك يمكن القول إن الكود العربي السوري يجب أن لا يسمح بوصول  $r$  لهذه القيمة ما دام الجدار يقاوم الحمولات الزلزالية، وإلا يجب إهماله في مقاومة هذه الأحمال.

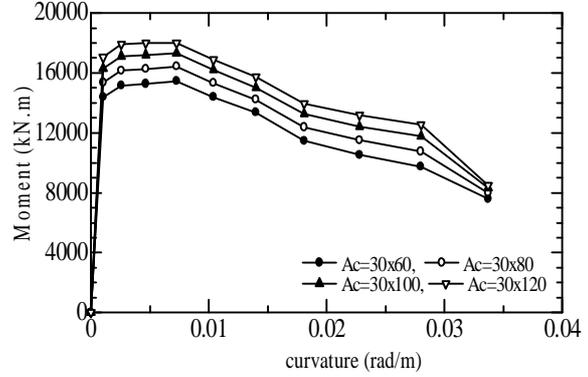
#### 7- تأثير تغير طول الجدران

بغرض دراسة تأثير طول الجدار في المطاوعة، درست ثلاثة جدران بأطول 3م، 5م، 7م، وقد وضع عمود مخفي في كل من طرفي كل جدار أبعاده (30x60)سم وبنسبة تسليح 1% في حين وضع تسليح أدنى في المنطقة الواقعة بين العمودين المخفيين، نسبة تسليح 0.2%. وقد حسبت الحالات كلها من أجل  $r = 0.1$ . يبين الشكل (8) منحنيات العزم- انحناء للجدران المذكورة، كما يلخص الجدول (3) قيم الانحناء عند الخضوع وقيم الانحناء الأعظمية والمطاوعة لكل حالة.



الشكل (8) علاقة العزم بالانحناء - أطوال مختلفة للجدران

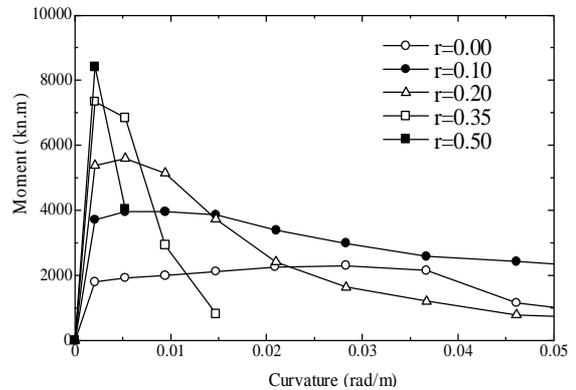
تقريباً، ولكن انهيار المقاومة يتم بمعدل أكبر من الحالة التي يتم فيها المحافظة على أبعاد العمود المخفي وزيادة نسبة التسليح.



الشكل (6) منحنيات العزم- الانحناء أبعاد عمود مخفي متغيرة

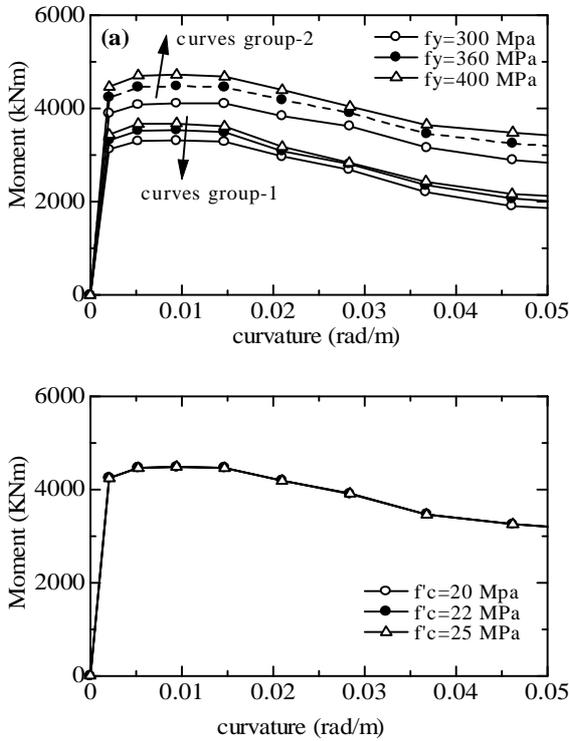
#### 6- تأثير شدة الأحمال الناظمية

درُس تأثير شدة الأحمال الناظمية في مطاوعة جدران القص من خلال دراسة مقاطع جدران قص بطول 3.0م وسماكة 0.3م، وقد وضع تسليح منتظم بمعدل قضيب قطر 12م كل 25سم على وجهي الجدار. بفرض  $r$  النسبة بين القوة الحديدية القصوى المعرض لها الجدار  $Nu$  والقوة الناظمية العظمى  $(Nu)_{max}$  المسموح تطبيقها على الجدار، حُسبت ورُسمت منحنيات علاقة عزم الانعطاف بالانحناء من أجل قيم  $r$  تساوي 0، 0.1، 0.2، 0.35، 0.5. يبين الشكل (6) علاقة عزم الانعطاف بالانحناء من أجل النسب المذكورة.



الشكل (7) علاقة العزم بالانحناء - تسليح منتظم

من الشكل (7) استخرج الجدول (2) من أجل حساب



الشكل (9): تأثير تغير  $f_y$  (a)، تأثير تغير  $f_c$  (b)

يبين الشكل (9b) علاقة عزم الانعطاف مع الانحناء مع تثبيت  $f_y$  وتغير  $f_c$ . هذا وقد تم تغيير عامل المرونة لكل حالة وفق العلاقة الواردة في البند (5)، ونلاحظ هنا انطباقاً شبه تام للمنحنيات الثلاثة. هذا يدل على أن تغيير  $f_c$  ضمن مجال القيم المختارة لا يعطي تأثيراً سواء في مطاوعة الانحناء أو العزم المقاوم للمقطع. وقد بلغت مطاوعة الانحناء نحو 8.5.

#### 9- استنتاجات وتوصيات

درست في هذا البحث بعض العوامل ذات الصلة بمطاوعة الانحناء في جدران القص من خلال حساب ورسم منحنيات تمثل العلاقة بين عزم الانعطاف والانحناء لمقاطع هذه الجدران ومن ثم حساب مطاوعة الانحناء. يمكن تلخيص نتائج البحث وتوصياته بما يأتي:

يتبين من الشكل (8) والجدول (3) أن المطاوعة تتناقص بشكل واضح مع زيادة أطوال جدران القص، فضلاً عن معدل تناقص أكبر للعزم المقاوم مع زيادة طول الجدران.

الجدول (3) قيم مطاوعة الانحناء - أطوال مختلفة للجدران

case No.	Lw (m)	phi-y	phi-u	duc
1	3	0.0021	0.021	10
2	5	0.0021	0.0125	6.0
3	7	0.0021	0.0089	4.2

#### 8- تأثير خواص المواد

ندرس في هذا البند تأثير خواص المواد في مطاوعة الانحناء لجدران القص، وهي إجهاد الخضوع في الفولاذ  $f_y$ ، والمقاومة المميزة للبيتون على الضغط  $f_c$ . بالنسبة إلى لمقاومة المميزة للبيتون على الضغط، اختيرت المقاومات، (20، 25، 22) MPa وإجهاد خضوع الفولاذ، اختيرت الإجهادات، (300، 360، 400) MPa. وقد اختيرت جدران مقاطعها ذات سماكة 30 سم وطولها 300 سم وقد حسبت الحالات كلها من أجل  $r=0.1$ .

يبين الشكل (9a) علاقة عزم الانعطاف-الانحناء وذلك في حالتين: تسليح منتظم على كامل الجدار (T12/25cm) وهي مجموعة المنحنيات (1)، وتسليح منتظم (T10/25cm) مع وجود أعمدة مخفية تحقق الأبعاد الدنيا وتسليح (6T20) وهي مجموعة المنحنيات (2). وقد بلغت مطاوعة الانحناء لمجموعتي المنحنيات نحو 10. لم يلاحظ تغير يذكر على مطاوعة الانحناء عند تغير إجهاد الخضوع للفولاذ ضمن مجال القيم المختارة، علماً أن العزم المقاوم يزداد بشكل واضح.

أ- مع زيادة القوة الناظمية المطبقة على جدران القص تقل مطاوعتها، وتكاد تتعدم عند تعرض جدران القص لقوة ضغط ناظمية تصل إلى 50% من القوة الناظمية العظمى المسموح تطبيقها على الجدار.

ب- في مقاطع جدران القص ذات التسليح المنتظم تقل المطاوعة مع زيادة نسبة التسليح.

ت- في مقاطع جدران القص ذات الأعمدة المخفية، تبقى المطاوعة مستقرة مع زيادة نسبة التسليح في هذه الأعمدة.

ث- تقل المطاوعة بشكل واضح مع زيادة طول جدران القص، لذلك يفضل استخدام جدران متعددة قصيرة في كل من الاتجاهين الرئيسيين للبناء حيث يمكن ذلك.

ج- يوصى بمراجعة القوة الناظمية المسموحة تطبيقها على جدران القص التي تسهم في مقاومة الأحمال الزلزالية في الكود العربي السوري، وعدم السماح بقوة ناظمية تجعل مطاوعة الجدران قليلة إلى حد غير مقبول.

ح- يوصى أيضاً بدراسة العوامل التي تؤثر في مطاوعة الدوران والانتقال لجدران القص.

## المراجع

- 1- الصادق، حافظ، و عيسى، فدوى (2008) "دراسة أثر التفاعل المتبادل بين جدران القص و الإطارات على المقاومة الزلزالية للأبنية" المؤتمر الدولي الأول للعلوم الهندسية، جامعة حلب، IESC2008، حلب، سورية.
- 2-International Conference of Building Officials, Uniform Building Code (1997), Whitter, CA.
- 3-الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ الإنشاءات بالخرسانة المسلحة 2004 وملحقاته، نقابة المهندسين السوريين، دمشق، سورية.
- 4-Three dimensional analysis and design of building systems, 2000, computers and structures inc., CA.