

الدراسة التحليلية لتصرف بلاطة بيتونية لاحقة الشد باستخدام توزيع مختلف لكابلات الشد

الباحثة : م. نجوى عيسى - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق

المخلص

تعتبر البلاطات الفطرية لاحقة الشد من الجمل الإنشائية المستخدمة في الأبنية متعددة الطوابق و التي أثبتت كفاءتها و فاعليتها واقتصاديتها بالمقارنة مع البلاطات البيتونية العادية من حيث تخفيض كمية التسليح و تخفيف السهوم و التشققات بشكل كبير وواضح، توفر الكودات المختلفة طرقاً تقريبية لحساب البلاطات لاحقة الشد و التي يمكن تطبيقها فقط على البلاطات ذات التوزيع المنتظم للأعمدة، أما بالنسبة للمنشآت غير المنتظمة فيجب إجراء التحليل العددي باستخدام طرق دقيقة مثل طريقة العناصر المحدودة (FEM)، حيث تستخدم برامج مختلفة لتحليل و تصميم البلاطات لاحقة الشد و التي لا تعطي بالضرورة نتائج متطابقة مثل ETABS [1] و ADAPT Builder [2] و ، عند تصميم البلاطات لاحقة الشد يمكن استخدام توزيع مختلف لكابلات الشد [3] مثل التوزيع المنتظم في الاتجاهين (Distributed/Distributed) أو التوزيع المركزي للكابلات ضمن شريحة عمودية في أحد الاتجاهين والتوزيع المنتظم بالاتجاه الآخر (Banded/Distributed) أو تركيز الكابلات ضمن شريحة عمودية في كلا الاتجاهين (Banded/Banded)، و يعتمد بشكل أساسي اختيار توزيع الكابلات في البلاطات الفطرية لاحقة الشد على خبرة المصمم.

سيتم في هذه المقالة تصميم بلاطات لاحقة الشد بنسب طول إلى عرض مختلفة و ذلك تحت تحت تأثير حمولات شاقولية موزعة بانتظام، و مقارنة النتائج العددية باستخدام برامج تستخدم طريقة العناصر المحدودة ، كما سيتم مقارنة السهم و قدرة تحمل الإنعطاف للبلاطات في حال استخدام توزيع مختلف لكابلات الشد.

تبين من هذه الدراسة بأن استخدام البرنامج ADAPT أفضل من ETABS بسبب المرونة و السهولة في نمذجة البلاطات لاحقة الشد و استخلاص النتائج، كما اتضح من الدراسة بأن استخدام التوزيع من النوع Banded-Distributed يزيد من قدرة تحمل المقطع على العزم و

بنفس الوقت يقلل م من السهم الأعظمي للبلاطات لاحقة الشد بشكل واضح مقارنة مع النموذجين الباقيين.

الكلمات المفتاحية: بلاطة لاحقة الشد ، طريقة عناصر محدودة ، توزيع كابلات ، سهم ، انعطاف

Analytical Study of Post-Tensioned Concrete Slab Using Different Tendons Arrangement

Abstract

Post-tensioned slabs are increasingly recently used in multi-story buildings since they are effective and economic in comparison with flat slabs in relevant to decreasing obviously the reinforcement quantities deflections and cracks, codes provide approximate methods for designing of post-tensioned flat slabs with regular columns arrangements, however, numerical analysis should performed regarding to irregular buildings, by finite elements methods (FEM), many commercial programs are used for analyzing and designing pt. slabs as ETABS [1] and ADAPT Builder [2], Different tendons arrangements are used when designing pt. slabs as Banded-Distributed, Distributed-Distributed and Banded-Banded, and choosing the best arrangement depend on the engineer experience.

This paper aim to study post-tensioned slabs with different aspect ratios under regularly distributed vertical loads, where firstly, numerical comparison study are performed using finite elements programs and secondly, deflections and nominal moment capacity of pt. slab are compared due to different tendon arrangements.

This study shows that using ADAPT Builder is significantly easier than ETABS in modeling, designing and checking post-tensioned slabs. Moreover, using the tendons arrangement type Banded-Distributed can increase the bending resistance and decrease the deflection significantly together with improving the ductility whatever the pt. slab aspect ratio in comparison with the other arrangements.

Key words: Post-tensioned slab, FEM, Tendon arrangements, Deflection, Moment

المقدمة:

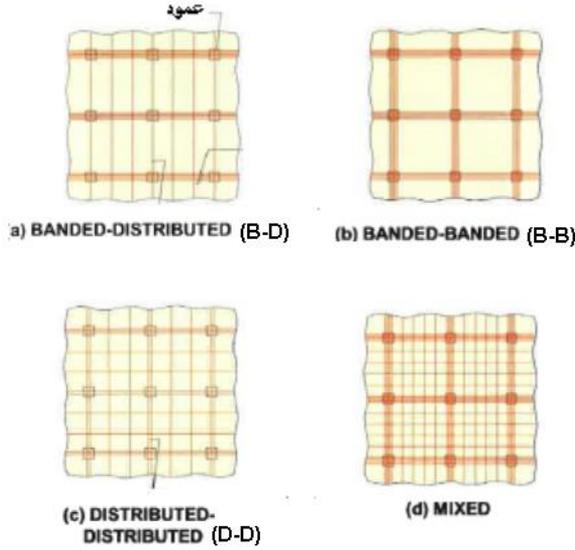
تم استخدام البيتون لاحق الشد في العقود الأخيرة بنجاح في أمريكا و جنوب شرق آسيا و استراليا و أوروبا، حيث أنه تم في أمريكا استثمار ما يعادل بليون متر مربع من البلاطات لاحقة الشد [4]، بلاطات الأقبية زادت من استخدامه بسبب الحاجة الى مجازات كبيرة و سماكة صغيرة للبلاطة، كما تم استخدامه في الجسور و بلاطات الأرضيات (slab on grade) و الأساسات و بلاطات النقل (transfer slab) [3]

بالإضافة الى الاقتصادية العالية في تنفيذ و صيانة البلاطات لاحقة الشد بالمقارنة مع البلاطات البيتونية المسلحة بتسليح عادي فإن للمباني لاحقة الشد مميزات كثيرة منها [3]:

- 1) مقاومة الشد العالية للكابلات و التي تساوي أربع مرات و نصف مقاومة التسليح العادي، (2) لا تحتاج الى تسليح أصغري لمقاومة التقلص و التغيرات الحرارية، (3) السماح بمجازات كبيرة و سماكات صغيرة، حيث أنه بمجرد زاد المجاز عن 5 متر فإن البلاطة لاحقة الشد تحتاج الى سماكة أخفض بثلاث من سماكة البلاطات العادية بافتراض التحميل نفسه و بالتالي الحاجة الى كميات أقل للأعمدة و الجدران و الأساسات، (4) مناسبة للتوزع غير المنتظم للأعمدة و الجدران، (5) القدرة الكبيرة على تحمل القوى المركزة في المرحلة الاستثمارية بدون حدوث تشققات أو سهوم مقارنة مع البلاطات التقليدية، (6) تشققات قليلة و بالتالي حفظ التسليح من الصدأ، (7) تخفيض الارتفاع الطابقي و بالتالي تخفيض الارتفاع الإجمالي للمبنى.
- يجب تصميم البلاطات لاحقة الشد بحيث تكون إجهادات الشد و الضغط في مرحلتي التنفيذ (transfer of post tensioning condition) و الاستثمار (serviceability condition) ضمن الحدود المسموحة، و بحيث تؤمن مقاومة كافية للانعطاف و القص تحت تأثير الأحمال المصعدة.

يتم توزيع كابلات الشد بطرق مختلفة (الشكل 1) مثل التوزيع المنتظم في الاتجاهين (Distributed-Distributed) أو التوزيع المنتظم بالاتجاه الطويل و التوزيع المركزي للكابلات ضمن شريحة عمودية في الاتجاه القصير (Distributed-Banded) أو التوزيع المركزي للكابلات ضمن شريحة عمودية في الاتجاه الطويل والتوزيع المنتظم بالاتجاه القصير (Banded-Distributed) أو تركيز الكابلات ضمن شريحة عمودية في كلا الاتجاهين (Banded/Banded).

سيتم في هذه المقالة تصميم البلاطات لاحقة الشد، حيث ستنمذج البلاطة باستخدام برامج مختلفة ثم مقارنة النتائج، و أخيرا سيتم دراسة تأثير توزيع كابلات الشد على تصرف الانعطاف والسهم .



الشكل (1): التوزيع المختلف لكابلات الشد [4]

1- التحليل الإنشائي باستخدام طريقة العناصر المحدودة (FEM) - مقارنة برامج النمذجة:

في هذه الفقرة سيتم إجراء التحليل الإنشائي للبلاطة البيتونية لاحقة الشد باستخدام برامج النمذجة الإنشائية [1] ETABS، [2] ADAPT Builder، حيث سيتم مقارنة قيم عزوم الانعطاف و قوة سبق الإجهاد بعد أخذ الضياعات بعين الاعتبار.

تم تصميم البلاطة باعتماد الفرضيات التالية:

- (1) التصميم باستخدام الكود الأمريكي ACI 318 M-11.
- (2) أبعاد البلاطة 12m x12m و بسماكة 30cm بحيث تكون نسبة طول المجاز إلى السماكة مساوية إلى 40.
- (3) تم افتراض أبعاد الأعمدة 400mm x400mm
- (4) الحمولة الحية المطبقة (LL) = 5KN/m²، و الحمولة الميتة المطبقة (DL) (وزن ذاتي + وزن تغطية) حيث وزن التغطية = 2.5 KN/m².
- (5) مقاومة الضغط الإسطوانية للبيتون (cylindrical compressive strength) $f'_c = 35 \text{ Mpa}$ (of concrete) و مقاومة الضغط الإسطوانية للبيتون في مرحلة الشد الابتدائية (cylindrical compressive strength of) $f_{ci} = 26 \text{ Mpa}$ (concrete at time of initial prestress) ، و معامل المرونة للبيتون (Modulus of elasticity concrete) $E_c = 29734 \text{ Mpa}$
- (6) تم افتراض كابلات بدون تماسك (unbonded tendons) بحيث قطر الكابل الواحد 13mm و مساحة مقطعه 99 mm²، و إجهاد الشد للكابل (specified tensile strength of prestressing reinforcement) $f_{pu} = 1860 \text{ Mpa}$ ، و إجهاد السيالان للكابل (specified yield strength of) $f_{py} = 1700 \text{ Mpa}$ (prestressing reinforcement) و معامل المرونة لفولاذ الكابلات (Modulus of elasticity prestressing steel) $E_p =$

- 29734 Mpa، و قوة الشد الفعالة (effective force) في كل كابل تساوي $P = 118KN$ و ذلك بعد حسم الضياعات.
- (7) تم افتراض أن الكابلات تمتد بشكل قطع مكافئ مع افتراض بعد مركز ثقل الكابلات عن أسفل و أعلى المقطع يساوي 25cm.
- (8) تم اعتماد توزيع و عدد الكابلات بحيث تتمركز ضمن شريحة عمودية في الاتجاه الأفقي وتتوزع بشكل منتظم بالاتجاه الشاقولي (Banded/Distributed) ، و يمكن ترميزها ب B-D بحيث تكون إجهادات الشد و الضغط في مرحلتي التنفيذ و الاستثمار ضمن الحدود المسموحة، و يوضح الشكل (2) توزيع هذه الكابلات و عددها في المسقط.
- (9) توضح الأشكال (من 3 إلى 10) ملخص لنتائج عزوم الإنعطاف و قوى سبق الإجهاد و قيم السهوم الناتجة في كل برنامج، حيث يظهر في الشكلان (3 و 4) قيم عزوم الإنعطاف عند المواقع a ، b ، c تحت تأثير تركيب الحملات الإستثمارية الكلية (حمولة مينة + حمولة حية + قوة سبق إجهاد)، أما الشكل (5) فيوضح المقارنة في قيم عزوم الإنعطاف عند المواقع a ، b ، c، كما يوضح الشكلان (6 و 7) قيم قوى سبق الإجهاد عند المواقع e ، f ، g و ذلك بعد أخذ الضياعات بعين الاعتبار، أما المقارنة في قيم قوى سبق الإجهاد يمكن توضيحها في الشكل (8)، و الشكلان (9 و 10) يوضحان قيم السهوم المرنة الناتجة في البلاطة و ذلك تحت تأثير تركيب الحملات الإستثمارية الكلية.

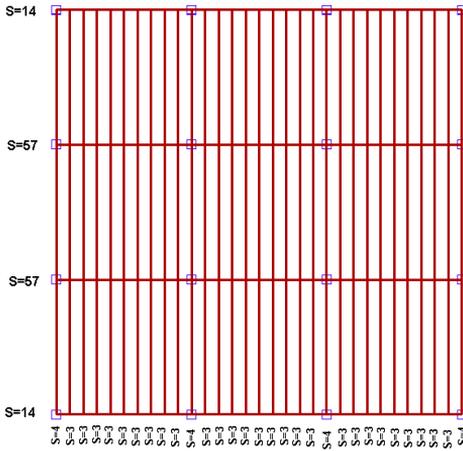
يمكن ملاحظة مايلي من النتائج الموضحة في الشكلان (5 و 8):

- 1- قيم العزوم السالبة عند المواقع a و c في برنامج الـ ETABS أكبر بالمقارنة مع برنامج الـ ADAPT ، أما قيم العزوم الموجبة عند الموقع b فهي متقاربة جدا، و قد يعود السبب إلى أن برنامج الـ ETABS يأخذ بعين الاعتبار صلابة الأعمدة

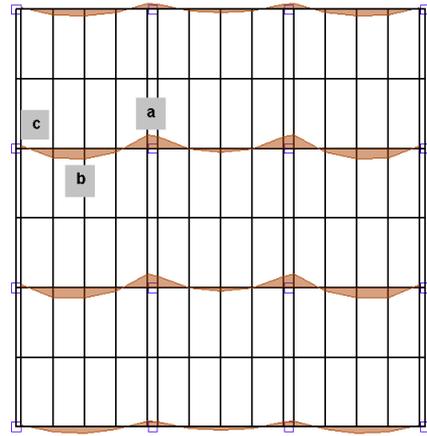
2- إن قيم قوة سبق الإجهاد متقاربة بشكل كبير بين البرنامجين، و أيضا قيمها قريبة من الحساب اليدوي.

3- إن برنامج الـ ADAPT يزود المستخدم بقيم الاستطالة للكابلات (Elongation) بينما برنامج الـ ETABS لا يوجد فيه خاصية حساب الاستطالة

4- من الواضح أن قيم السهوم الناتجة في البرنامجين متطابقة.



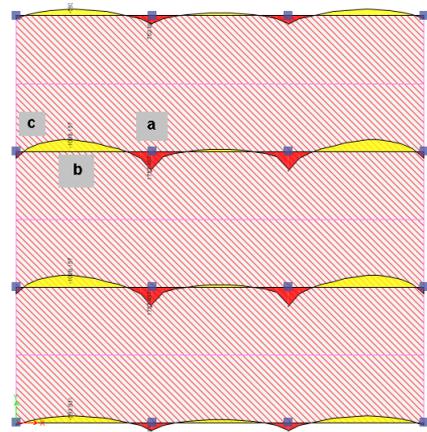
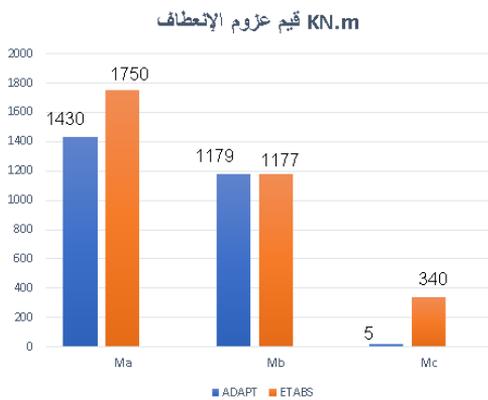
الشكل (3): مخطط عزم الإنعطاف باستخدام



الشكل (2): التوزيع banded/distributed

برنامج ADAPT

و عدد الكابلات

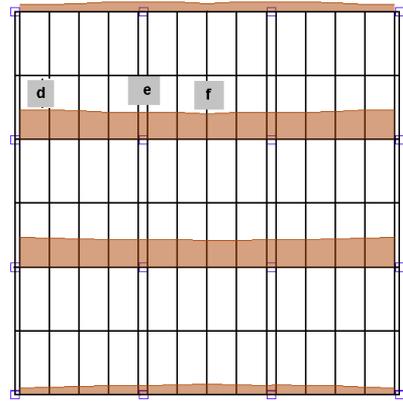
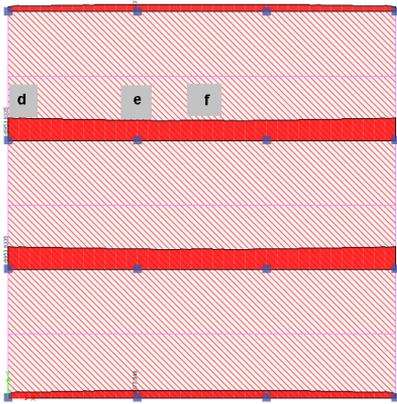


الشكل (4): مخطط عزم الإنعطاف باستخدام

الشكل (5): مقارنة نتائج عزوم الإنعطاف

برنامج ETABS

في المواقع a ، b ، c

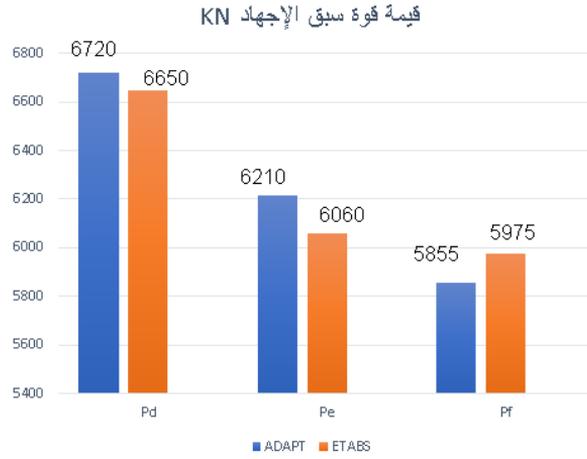


الشكل (7): مخطط قوة سبق الإجهاد

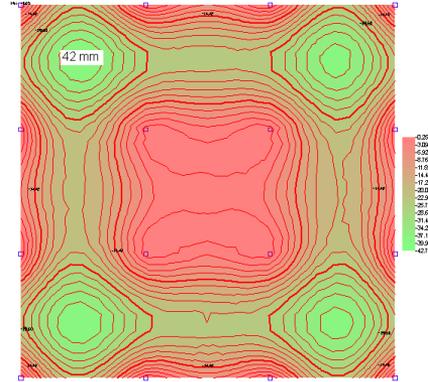
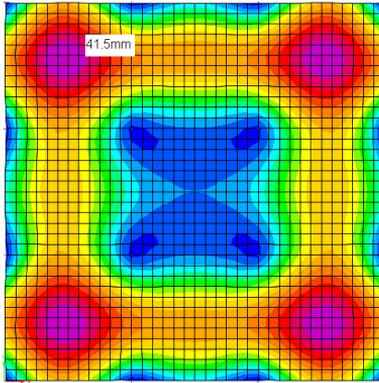
الشكل (6): مخطط قوة سبق الإجهاد

باستخدام برنامج ETABS

باستخدام برنامج ADAPT



الشكل (8): مقارنة نتائج قوى سبق الإجهاد في المواقع f, e, d



الشكل (10): مخطط السهم باستخدام

الشكل (9): مخطط السهم باستخدام

برنامج ETABS

برنامج ADAPT

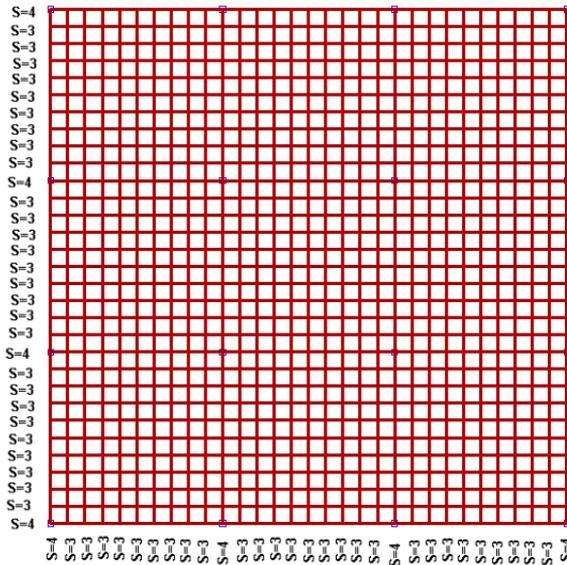
2- دراسة تأثير التوزيع المختلف للكابلات و اختلاف نسب أبعاد البلاطة على قيم السهم و عزوم الإنعطاف:

سيتم في هذه الفقرة دراسة بلاطات لاحقة الشد باستخدام برنامج ADAPT مع افتراض نسب مختلفة لأبعاد البلاطة (aspect ratio) و توزيع مختلف للكابلات، و ذلك لدراسة تأثيرها على قيم السهوم و عزوم الإنعطاف حيث سيتم دراسة مايلي:

- 1- بلاطة بأبعاد 12 m x 2 m (نسبة الطول إلى العرض = 1)
- 2- بلاطة بأبعاد 9 m x 12 m (نسبة الطول إلى العرض = 1.33) و
- 3- بلاطة بأبعاد 6 m x 12 m (نسبة الطول إلى العرض = 2)

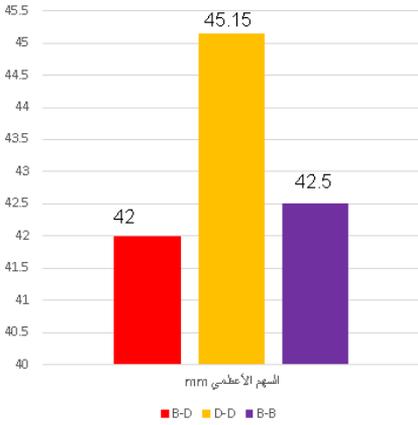
3-1 بلاطة بأبعاد 12 m x 2 m (نسبة الطول إلى العرض = 1):

تم مسبقا دراسة توزيع كابلات من نوع distributed banded (B-D) ، و سيتم في هذه الفقرة دراسة نوعين إضافيين هما distributed-distributed (D-D) و banded-banded (B-B)، و كانت كمية الكابلات المستخدمة في كل نموذج 5.3 kg/m² و 4.15 kg/m² و 4.7 kg/m² على الترتيب، حيث يتبين من الشكلان (11 و 12) توزيع و عدد الكابلات في النموذجين بحيث تكون إجهادات الشد و الضغط ضمن الحدود المسموحة.

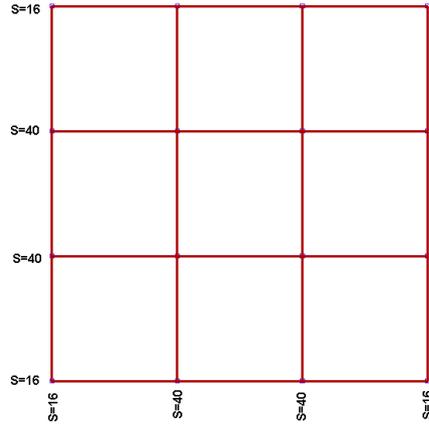


الشكل (11): التوزيع من نوع D-D و عدد الكابلات

و يمكن توضيح قيم السهوم تحت تأثير تراكيب الأحمال الإستثمارية الكلية في الشكل (13)، و بالمقارنة بين النماذج الثلاثة يمكن الوصول إلى نتيجة أنه من أجل نسبة أبعاد للبلاطة مساوية إلى 1 فإن قيم السهم متطابقة في حال تم اعتماد توزيع B-D أو B-B و تزداد قيم السهم عند استخدام النموذج D-D، أما عند مقارنة قدرة المقطع على تحمل عزوم الإنعطاف (moment capacity) للنماذج الثلاثة في منتصف المجاز - عند الموقع b- مع افتراض وجود كابلات فقط و عدم وجود تسليح عادي، فإن الشكل (14) يوضح أن اعتماد التوزيع من نوع B-D يزيد من قدرة تحمل مقطع البلاطة لاحقة الشد على العزم، بينما التوزيع من نوع D-D قد أعطى أقل قيمة لقدرة المقطع على تحمل عزم الإنعطاف و هذا يدل على أن النموذج D-D يحتاج إلى كمية تسليح عادي إضافية أكثر من النموذجين الباقيين و أن النموذج B-D يتطلب تسليح عادي إضافي أقل.

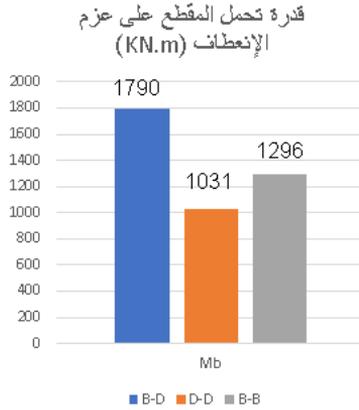


الشكل (13): مقارنة قيم السهوم الأعظمية للنماذج



الشكل (12): التوزيع من نوع B-B و عدد الكابلات الثلاثة

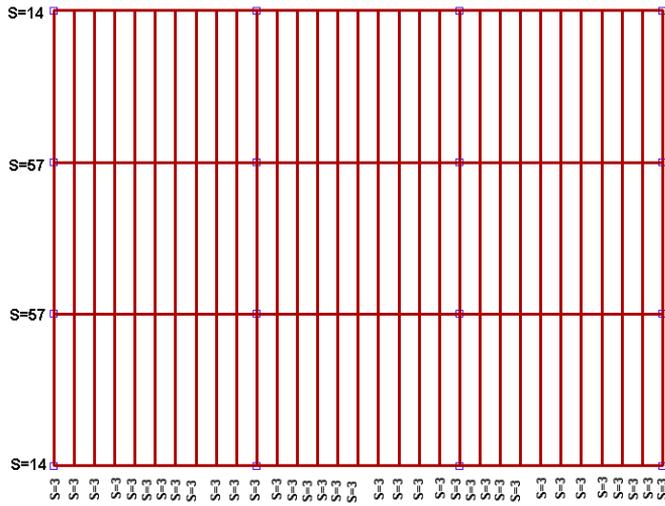
من أجل بلاطة بنسبة طول إلى عرض = 1



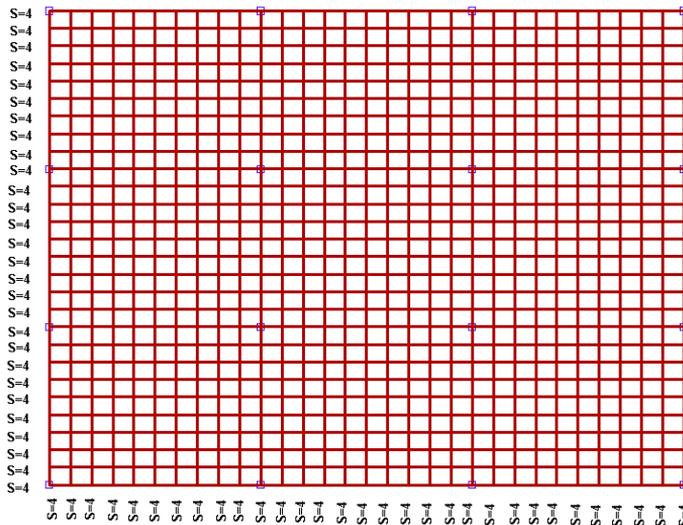
الشكل (14): مقارنة نتائج قدرة تحمل المقطع على العزم للنماذج الثلاثة في منتصف المجاز-النقطة b- من أجل بلاطة بنسبة طول إلى عرض = 1

2-3 بلاطة بأبعاد 1 2mx 9 m (نسبة الطول إلى العرض = 1.33):

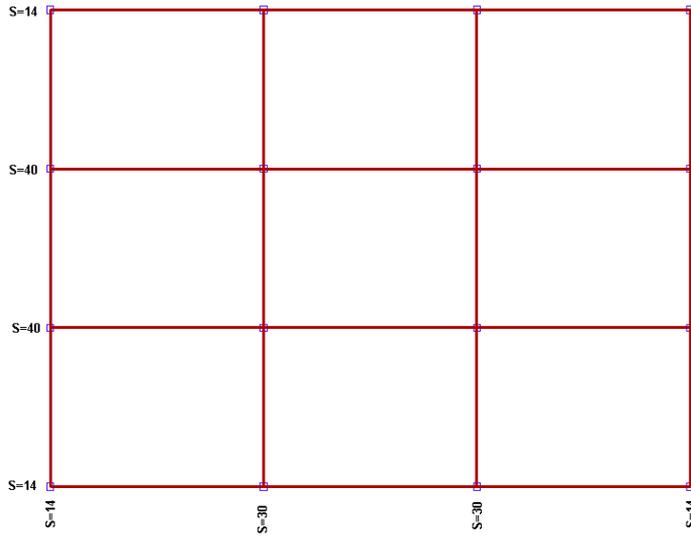
سيتم في هذه الفقرة دراسة ثلاثة أنواع من التوزيع B-) banded-distributed و (D) distributed-distributed و (D-D) distributed-distributed و (B-B) banded-banded، و كانت كمية الكابلات المستخدمة في كل نموذج 6 kg/m² و 5.8 kg/m² و 4.95 kg/m² على الترتيب، حيث يتبين من الأشكال (15 و 16 و 17) توزيع و عدد الكابلات في النماذج الثلاثة بحيث تكون إجهادات الشد و الضغط ضمن الحدود المسموحة.



الشكل (15): التوزيع من نوع B-D و عدد الكابلات

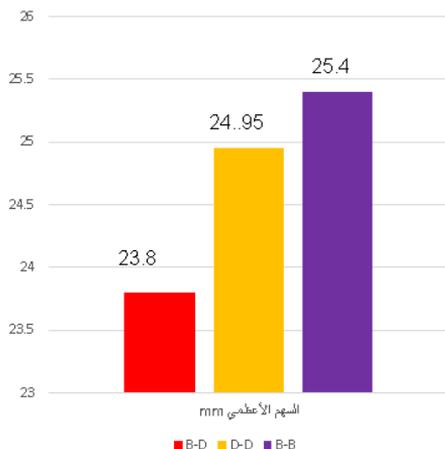


الشكل (16): التوزيع من نوع D-D و عدد الكابلات



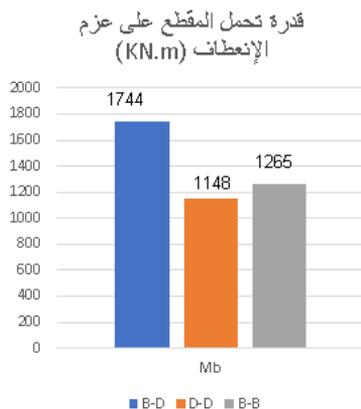
الشكل (17): التوزيع من نوع B-B و عدد الكابلات

و يمكن توضيح قيم السهوم تحت تأثير تراكيب الأحمال الإستثمارية الكلية في الشكل (18)، و بالمقارنة بين النماذج الثلاثة يتبين أنه من أجل نسبة أبعاد للبلاطة مساوية إلى 1.33 فإن التوزيع من نوع B-B يعطي قيم سهم أكبر بالمقارنة مع النموذجين الباقين ، بينما تقل قيم السهوم عند استخدام النموذج B-D، أما عند مقارنة قدرة المقطع على تحمل عزوم الإنعطاف (moment capacity) للنماذج الثلاثة في

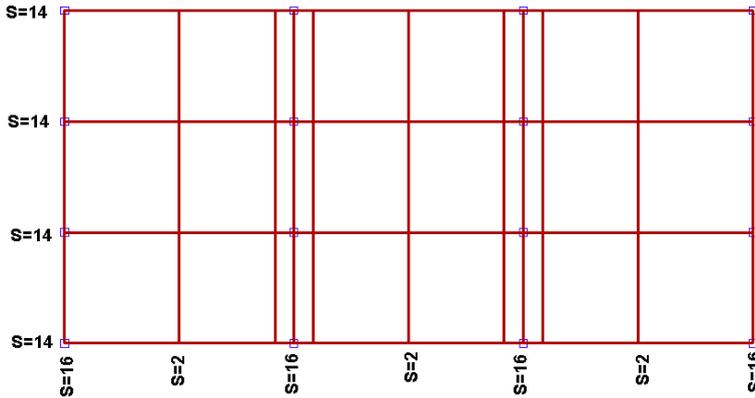


الشكل (18): مقارنة قيم السهوم الأعظمية للنماذج الثلاثة من أجل بلاطة بنسبة طول إلى عرض = 1.33

منتصف المجاز - عند الموقع b- مع افتراض وجود كابلات فقط و عدم وجود تسليح عادي، فإن الشكل (19) يوضح أن اعتماد التوزيع من نوع B-D يزيد من قدرة تحمل مقطع البلاطة لاحقة الشد على العزم، بينما التوزيع من نوع D-D قد أعطى أقل قيمة لقدرة المقطع على تحمل عزم الإنعطاف و هذا يدل على أن النموذج D-D يحتاج إلى تسليح عادي إضافي أكثر من النموذجين الباقيين و أن النموذج B-D يتطلب تسليح إضافي أقل.

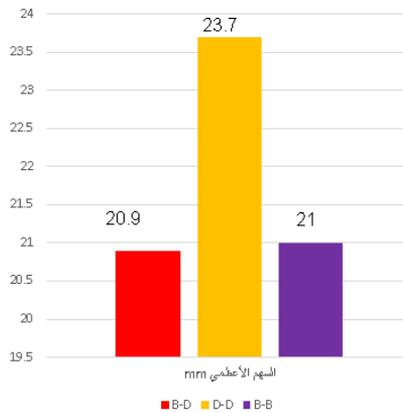


الشكل (19): مقارنة نتائج قدرة تحمل المقطع على العزم للنماذج الثلاثة في منتصف المجاز -النقطة b من أجل بلاطة بنسبة طول إلى عرض = 1.33

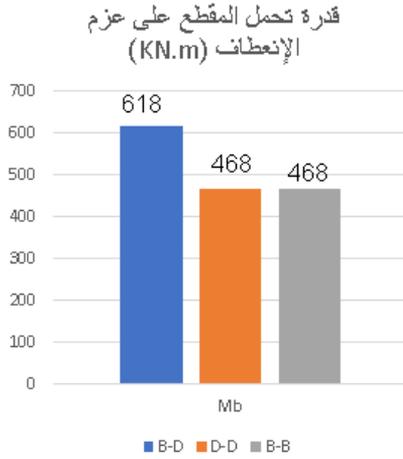


الشكل (22): التوزيع من نوع B-B و عدد الكابلات

عند مقارنة السهم الأعظمي الناتج عن تأثير التراكيب الاستثمارية الكلية حسب الشكل (23) يمكن ملاحظة قيم سهم متطابقة في حال استخدام نوعي التوزيع B-B و D-B ، و تكبر القيمة بنسبة 13% عند استخدام التوزيع من نوع D-D ، و بمقارنة قيم تحمل عزم الإنعطاف الإسمية لمقطع البلاطة مع افتراض استخدام كابلات فقط فيمكن الملاحظة من الشكل (24) بأن التوزيعين B-B و D-D قد أعطيا نفس القيمة بينما نتج عن التوزيع B-D قيمة تحمل أكبر بالمقارنة مع النموذجين الباقيين، و هذا ينعكس بدوره على قيم التسليح العادي التي يجب إضافتها من أجل قدرة تحمل إنعطاف كافية لمقاومة تراكيب الأحمال المصعدة.



الشكل (23): مقارنة قيم السهوم الأعظمية للنماذج الثلاثة من أجل بلاطة بنسبة طول إلى عرض = 2



الشكل (24): مقارنة نتائج قدرة تحمل المقطع على العزم للنماذج الثلاثة في منتصف المجاز-النقطة b من أجل بلاطة بنسبة طول إلى عرض = 1.33

4 الملخص:

عند إجراء الدراسة التحليلية لتأثير توزيع الكابلات على تصرف بلاطات بيتونية لاحقة الشد لها نسبة مجاز إلى سماكة مساوية إلى 40 و لها نسب طول إلى عرض مختلفة 1 و 1.33 و 2 تبين أن:

- بالمقارنة بين برنامجي التحليل تبين أن برنامج ETABS يعطي قيم عزوم كبيرة فوق المساند بينما تتساوى القيم في منتصف المجاز عن استخدام ETABS أو ADAPT، و أيضا تنتج قيم سهوم أعظمية و قوى سيق إجهاد متقاربة عند استخدام كلا البرنامجين.
- برنامج ADAPT مخصص للبلاطات لاحقة الشد، لذلك يوجد سهولة في النمذجة ووضوح في تحقيق الإجهادات و حساب الاستطالة.
- من أجل بلاطات بنسبة طول إلى عرض = 1 فإن استخدام توزيع كابلات من نوع B-D يعطي سهم أقل و كفاية مقطع على العزم أكبر، لذلك يعتبر التوزيع الأمثل لهذا النوع من البلاطات أما التوزيع من النوع B-B قد نتج عنه قيمة سهم صغيرة مساوية تقريبا لما نتج عن التوزيع B-D إلا أنه أعطى قدرة تحمل أقل على العزم، و يعتبر

التوزيع من النوع D-D هو الأسوأ في هذه الحالة لأنه نتج عنه السهم الأكبر و قدرة التحمل على الانعطاف الأقل.

- من أجل بلاطات بنسبة طول إلى عرض = 1.33 فيعتبر التوزيع B-D هو التوزيع الأمثل بسبب قيم السهم الأصغرية الناتجة و قدرة تحمل الأكبر مقارنة مع النوعين الباقيين، و يعتبر التوزيع B-B هو الأسوأ من ناحية السهم، أما القيم المتدنية في قدرة التحمل على عزم الإنعطاف فقد نتجت بسبب استخدام التوزيع من نوع D-D.
- من أجل بلاطات بنسبة طول إلى عرض = 2، إن هذه النسبة تعني أن البلاطة تعمل باتجاه وحيد و هو الإتجاه القصير حيث تفرض على المصمم وخصوصا في التوزيع من النوع B-D بتكثيف الكابلات عند الشريحة العمودية في الإتجاه القصير و توزيعها بشكل منتظم في الإتجاه الطويل و بذلك ينتج عن هذا التوزيع قيم سهم قليلة و قدرة تحمل على العزم كبيرة بالمقارنة مع النوعين الباقيين، و قد نتج عن التوزيعين B-B و D-D نفس قدرة التحمل، أما التوزيع B-B قد أعطى القيمة الأكبر للسهم و بذلك يعتبر التوزيع من النوع B-B هو التوزيع الأسوأ في هذا النموذج من البلاطات.

References:

- [1] ETABS Version 16.0.0, Structural Analysis Program, Computers, and Structures, Inc...
- [2] ADAPT structural concrete software system, ADAPT-FLOOR” Post-tensioning institute, Aalami, B.O., and Boinmer, A.
- [3] B.O.Aalami,(2014), "Post- tensioned buildings design and construction ", Library of congress, China.
- [4] Bondy, K. B., (2012). "Two-way post- tensioned slab with bonded tendons," PTI J., **8**(2), 43-48.
- [5] ACI 318 M-11, and Commentary, (ACI 318 RM-11) Building Code Requirements for Structural Concrete.

6 الرموز المستخدمة:

f'_c : مقاومة الضغط الإسطوانية للبيتون (cylindrical compressive strength of concrete)

f_{ci} : مقاومة الضغط الإسطوانية للبتون في مرحلة الشد الإبتدائية (cylindrical compressive strength of concrete at time of initial prestress)

E_c : معامل المرونة للبيتون (Modulus of elasticity concrete)

f_{pu} : إجهاد الشد للكابل (specified tensile strength of prestressing reinforcement)

f_{py} : إجهاد السيلاّن للكابل (specified yield strength of prestressing reinforcement)

E_p : معامل المرونة لفولاذ الكابلات (Modulus of elasticity of prestressing steel)

P: قوة سبق الإجهاد

LL: الحمولة الحية المطبقة

DL: الحمولة الميتة المطبقة

