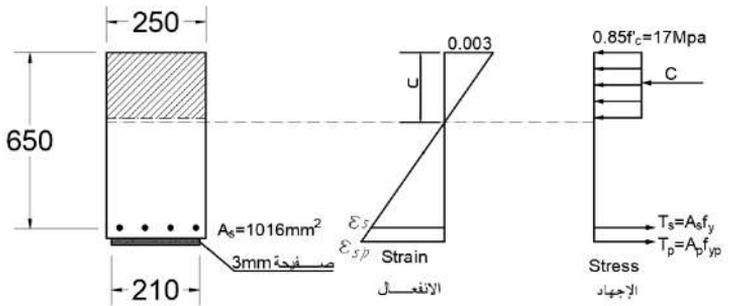




منشورات جامعة الفرات
كلية الهندسة المدنية بالقرعة

بيتون مسلح (1)



تأليف:

د.م. ريم خرتش

أستاذ مساعد في قسم الهندسة الإنشائية

السنة الثالثة

مديرية الكتب والمطبوعات الجامعية

1444هـ - 2023م



بيتون مسلح (1)





منشورات جامعة الفرات
كلية الهندسة المدنية بالرقعة

بيتون مسلّح (1)

تأليف:

د. ريم خرتش

أستاذ مساعد في كلية الهندسة المدنية بالرقعة

السنة الثالثة

مديرية الكتب والمطبوعات الجامعية

1444هـ - 2023م



الفهرس

الصفحة	الموضوع
9	مقدمة
11	الفصل الأول: مبادئ البيتون المسلح
11	1-1 مقدمة
11	2-1 مميزات ومساوئ البيتون
13	3-1 العناصر الإنشائية من البيتون المسلح
14	4-1 سلوك العناصر الإنشائية من البيتون المسلح
15	5-1 الخصائص الميكانيكية للبيتون
31	6-1 خصائص فولاذ التسليح
37	الفصل الثاني: الانكماش في البيتون
37	1-2 مقدمة
37	2-2 تغير الانكماش مع الزمن
37	3-2 العوامل المؤثرة على تقلص البيتون
38	4-2 السماكة الافتراضية للعنصر
39	5-2 حساب قيمة الانكماش النسبي في منشآت البيتون المسلح
41	6-2 حساب الإجهادات الناتجة عن الانكماش في البيتون المسلح
45	الفصل الثالث: الزحف في البيتون
45	1-3 مقدمة
45	2-3 آلية حدوث الزحف
46	3-3 أهم العوامل المؤثرة على الزحف (الجريان)
51	الفصل الرابع: طريقة الحدود القصوى في تصميم مقاطع البيتون المسلح
51	1-4 مقدمة
51	2-4 طرق الحدود التصميمية
52	3-4 مواصفات المواد

52	تصنيف الأحمال	4-4
53	تحقيق الأمان في طريقة الحدود القصوى	5-4
57	المبادئ الأساسية والفرضيات في طريقة الحدود القصوى	6-4
59	الفصل الخامس: تصميم المقاطع ذات التسليح الأحادي	
59	مقدمة	1-5
59	سلوك جائز من البيتون المسلح تحت تأثير الانعطاف البسيط	2-5
61	أنواع الانهيار في المرحلة الحديدية	3-5
61	توزع الانفعالات والإجهادات في مرحلة الحد الأقصى	4-5
62	حسابات التسليح في مقطع خاضع إلى انعطاف بسيط ومسلح بتسليح أحادي	5-5
65	مساحة التسليح القصوى في المقاطع أحادية التسليح	6-5
67	تغيزات نسبة التسليح العظمى وموقع المحور المحايد التوازني	7-5
69	المقاطع التوازنية والمقاطع فوق وتحت التوازنية	8-5
72	مساحة التسليح الدنيا	9-5
72	العزم المقاوم لمقطع مسلح بتسليح أحادي من أجل نسبة تسليح معينة	10-5
73	العوامل المؤثرة على المقاومة الحديدية	11-5
78	أمثلة على تحليل المقاطع أحادية التسليح وحساب العزم المقاوم	12-5
101	تصميم المقاطع البيتونية أحادية التسليح	13-5
102	أمثلة على تصميم المقاطع أحادية التسليح	14-5
111	الفصل السادس: المقاطع المستطيلة ثنائية التسليح المعرضة إلى انعطاف بسيط	
111	مقدمة	1-6
111	تأثيرات إضافة تسليح الضغط	2-6
111	تحليل المقاطع المستطيلة ثنائية التسليح	3-6
113	دراسة تلدن فولاذ الضغط	4-6
116	مساحة التسليح القصوى في مقطع ثنائي التسليح	5-6

117	العزم الأعظم الذي يتحمله مقطع ثنائي التسليح	6-6
118	مسائل على حساب العزم الحدّي الذي يتحمله مقطع ذو تسليح مفروض	7-6
131	مسائل على حساب التسليح الثنائي من أجل مقاومة عزم مفروض في مقطع مستطيل معلوم الأبعاد	8-6

139 الفصل السابع: الجيزان ذات المقطع T

139	مقدمة	1-7
139	العرض الفعال للجناح في الجيزان الحاملة لبلاطات مليئة	2-7
141	السماكة الدنيا للجناح	3-7
142	سلوك المقطع بحسب موقعه من الجائز	4-7
144	تحليل المقاطع بشكل T	5-7
147	مساحة التسليح القصوى من أجل مقطع بشكل T	6-7
149	العزم الحدّي (العزم المقاوم) الذي يتحمله مقطع بشكل T معلوم الأبعاد	7-7
150	أمثلة على حساب العزم المقاوم من أجل مقطع بشكل T	8-7
159	أمثلة على تصميم المقاطع بشكل T المعرضة إلى عزم انعطاف بسيط	9-7

169 الفصل الثامن: طريقة حدود الاستثمار في تصميم مقاطع البيتون المسلح

169	مقدمة	1-8
169	الاتحام بين الفولاذ والبيتون	2-8
170	الفرضيات في طريقة حدود الاستثمار	3-8
171	الإجهادات المسموحة في حالة التعرض إلى الانعطاف البسيط	4-8
172	تصميم المقاطع المستطيلة أحادية التسليح الخاضعة إلى الانعطاف البسيط	5-8
174	دراسة تغيرات ثوابت المقطع المستطيل مع مواصفات المواد	6-8
176	مسائل على تصميم مقطع مستطيل خاضع إلى انعطاف بسيط	7-8
179	تدقيق الإجهادات في مقطع مستطيل أحادي التسليح معرض إلى انعطاف بسيط	8-8
182	المقطع المتوازن والعزم المقاوم	9-8

186	تصميم المقاطع ثنائية التسلح الخاضعة إلى انعطاف بسيط	10-8
192	تصميم المقاطع بشكل T الخاضعة إلى الانعطاف البسيط	11-8
205	الفصل التاسع: تحليل وتصميم الجيزان من البيتون المسلح	
205	الأنظمة الستاتيكية للجيزان من البيتون المسلح	1-9
206	المجاز الفعال	2-9
209	ارتفاع الجائز	3-9
210	عرض الجائز	4-9
211	الحمولات المطبقة على الجيزان	5-9
213	نقل أحمال البلاطات المليئة إلى الجيزان	6-9
223	حدود النحافة في الجيزان	7-9
224	التحليل الخطي المرن في الجيزان المستمرة	8-9
226	تصعيد الحمولات	9-9
227	العزم الاعتباري	10-9
227	تأثير عرض المسند	11-9
228	طريقة الكود العربي السوري في إيجاد قيم العزوم السالبة والقوى القاطعة	12-9
330	ترتيبات التسليح في جيزان البيتون المسلح	13-9
234	أمثلة تطبيقية	14-9
259	المراجع	
261	دليل المصطلحات العلمية: عربي-انكليزي	

مقدّمة

يهدف هذا الكتاب إلى ترسيخ مفاهيم تصميم البيتون المسلح لدى الطالب، ويعدّ بداية سلسلة مقررات البيتون المسلح حيث يمثّل لبنة أساسية لفهم العلاقة بين المفاهيم الرياضية لتصميم العناصر البيتونية وسلوك هذه العناصر في أثناء زيادة الأحمال، ويعدّ انطلاقة أساسية في حساب الانفعالات والإجهادات في كل من طريقتي الحدود القصوى (الطريقة الحدّية) وحدود الاستثمار (الطريقة المرنة) والمقارنة بينهما وذلك وفقاً للكود العربي السوري لتصميم العناصر الخرسانية إصدار نقابة المهندسين للعام 2015.

تمّ الاهتمام بشكل خاص بطريقة الحدود القصوى حيث تمّ إغناء الكتاب بعدد كافٍ من الأمثلة المحلولة التي تمكّن الطالب من الوصول إلى تشكيل مفاهيم أساسية في تصميم عناصر البيتون المسلح وفهم سلوك هذه العناصر في أثناء مختلف مراحل التحميل.

يحتوي هذا الكتاب على تسعة فصول؛ يبيّن الفصل الأول منها مبادئ البيتون المسلح وخصائص كل من البيتون والفولاذ، بينما يتضمّن الفصل الثاني والثالث كلاً من الانكماش والزحف في البيتون، أمّا الفصل الرابع فيحتوي على مدخل إلى طريقة الحدود القصوى والفرضيات والمبادئ الأساسية في طريقة الحدود القصوى. يتمّ تصميم المقاطع مستطيلة المقطع أحادية التسليح وفق طريقة الحدود القصوى في الفصل الخامس، في حين يتمّ تصميم العناصر مستطيلة المقطع ثنائية التسليح في الفصل السادس، ويتضمّن الفصل السابع تصميم المقاطع ذات الشكل T، كما يعرض الفصل الثامن تصميم العناصر وفق طريقة حدود الاستثمار، وأخيراً يبدأ الفصل التاسع بتحليل وتصميم الجيزان من البيتون المسلح وترتيبات التسليح فيها.

وأخيراً عبّر عن شكري وامتناني العميق لوالدي ووالدتي الحبيبتين وإخوتي وأخي الذين كانوا عوناً دائماً لي في مشواري العلمي والعملية، وأتقدم بالشكر الجزيل لكل من أسهم في وصولي إلى هذه النقطة. أتمنى لطلابنا الأعزاء العنصر الأساسي في بناء مستقبل بلادنا التوفيق والنجاح وأن يكون هذا الكتاب عاملاً مساعداً لهم في دراستهم ومرجعاً مفيداً لهم في حياتهم الهندسية.

والله ولي التوفيق

دير الزور 2023

د. ريم فيصل خريش



الفصل الأول

مبادئ البيتون المسلح

Reinforced Concrete Principles

1-1 مقدمة:

يعدُّ البيتون المسلح أحد أهم مواد البناء في العالم؛ إذ يُستخدم تقريباً في كل أنواع المنشآت، مثل الأبنية والجسور والحدان الاستنادية، بطانات الأنفاق والخزانات وحتى في السفن. إنَّ البيتون عبارة عن خليط من الرمل والحصى ترتبط مع بعضها بوساطة عجينة اسمنتية مؤلفة من الإسمنت والماء بنسب معينة. يمكن أحياناً إضافة مواد كيميائية أخرى من أجل تحسين خصائص معينة في البيتون مثل قابلية التشغيل، الديمومة، زمن التصلب... الخ.

2-1 مميزات ومساوئ البيتون:

يملك البيتون مقاومة عالية على الضغط بينما تكون مقاومته على الشد منخفضة، لذلك تتم إضافة فولاذ التسليح لمقاومة إجهادات الشد. إنَّ البيتون المسلح عبارة عن مادة يتشارك فيها البيتون والفولاذ، حيث يؤمّن الفولاذ المقاومة على الشد التي يفقد إليها البيتون. الفولاذ أيضاً فعّال في المقاومة على الضغط حيث يحمل نسبة من حمولة الضغط في الأعمدة وفي حالات أخرى ستُدرس لاحقاً.

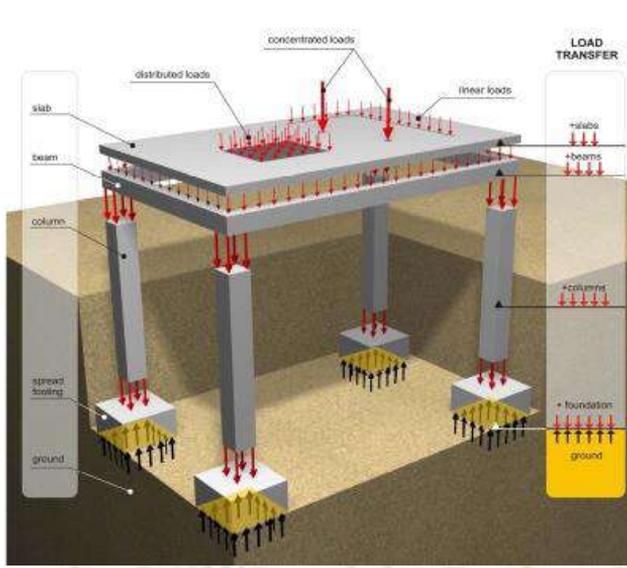
يمكن فهم الانتشار الهائل لمنشآت البيتون المسلح عن طريق معرفة مميزاته وهي:

- توفّر المواد الأولية وقلة كلفتها من رمل وحصى وماء؛ حيث إنها تشكل الجزء الأكبر في البيتون المسلح نسبة إلى الفولاذ والإسمنت.
- قابلية تشغيل البيتون Workability وفق أشكال مختلفة تخدم الناحية الوظيفية والمقاومة مثل: البلاطات والجيزان، الأعمدة والأقواس والقشريات المنحنية.
- لا يحتاج البيتون إلى خبرة تنفيذ عالية كما في المواد الأخرى كالمنشآت المعدنية.
- البيتون مادة قليلة تكاليف الصيانة مقارنة بالمواد الأخرى.
- مقاومة البيتون على الحريق عالية بسبب وجود تغطية بيتونية كافية للفولاذ حيث يتحمل البيتون المسلح درجات حرارة تصل إلى (500-700°C)؛ إذ تنخفض مقاومته على الشد حتى (5%)، في حين تنخفض مقاومته على الضغط حتى (50%).

- التحكم بالتركيب الحبي و عيار الإسمنت من أجل منشآت خاصة مثل: الجدران القصية والخزانات العالية والجسور والبيتون مسبق الإجهاد.
- الاحتفاظ بالمقاومة الثابتة حيث تزداد المقاومة على الانكسار مع الزمن وخصوصاً في الأيام الأولى حيث تصل بعد 7 أيام إلى (70%) وتصل بعد 28 يوم إلى 100%، وتسمى عندها المقاومة التصميمية حيث يحفظ أول 28 يوم في ماء درجة حرارته $20 \pm 2^{\circ}C$ حتى يكتسب المقاومة المرجوة. بعد خمس سنوات تصل مقاومة البيتون إلى 120%.
- على الرغم من كل ذلك يتوجب على المصمم أن يكون ملماً بنقاط ضعف البيتون بالإضافة إلى نقاط قوته حيث يُلاحظ أن بعض مساوئ البيتون هي التالية:
- مقاومة البيتون قليلة جداً على الشد مما يتطلب استخدام فولاذ تسليح في الأماكن المعرضة للشد.
- الحاجة إلى الدقة والعناية في التنفيذ حيث يستخدم قالب مناسب وقادر على التحمل، ويبقى في الموقع حتى تمام التصلب مما قد يعطي كلفة في التنفيذ. كذلك الأمر يجب وضع قضبان التسليح في مكانها والقيام بالرج بشكل مناسب وخصوصاً في مناطق التسليح الكثيف.
- ضخامة حجوم عناصر البيتون المسلح بالمقارنة مع الفولاذ مثلاً حيث يجب أخذ ذلك بالحسبان في الأبنية العالية والجسور ذات المجازات الطويلة؛ إذ تحتاج إلى أساسات هائلة لحملها.
- الحاجة إلى الحماية الكافية للفولاذ المستعمل في البيتون إذ ينتهي أمر العناصر البيتونية المسلحة بمجرد وصول الرطوبة والهواء إلى الفولاذ وتعرضه للصدأ والاهتراء.
- تأثر البيتون المصبوب حديثاً بالحرارة والصقيع حيث إن الحرارة العالية تؤدي إلى تبخر الماء بشكل مفرط مما يؤدي إلى زيادة الانكماش وحصول تشققات صغيرة عشوائية على السطح. أيضاً يؤدي الصقيع إلى تجمد ماء الجبل في الأوعية الشعرية السطحية للبيتون.
- تأثر البيتون بالمواد الكيميائية المنحلة بالماء، مما يؤدي إلى تخريب التركيب الكيميائي لمادة البيتون. لذلك تستعمل أنواع خاصة من الإسمنت في المنشآت المعرضة للمياه مثل ركائز الجسور.
- صعوبة إجراء تعديلات لاحقة في المقاطع البيتونية.

3-1 العناصر الإنشائية من الببتون المسلح Reinforced Concrete Elements

تتألف منشآت الببتون المسلح من مجموعة من العناصر، فمثلاً الأبنية تتألف من بلاطات Slabs مسنودة إلى جيزان Beams والتي تقوم بدورها بنقل الحمولات إلى الأعمدة Columns والتي تستند إلى الأساسات Foundations التي توزع الحمولة على مساحة كافية من التربة.



الشكل (1-1) انتقال الأحمال إلى الأساسات، مرجع رقم (10)

من المعلوم أن مقاومة الببتون على الضغط قوية بينما مقاومته على الشد ضعيفة جداً. حيث إن مقاومة الببتون على الشد تساوي تقريباً عُشر مقاومته على الضغط وبالنتيجة في حال صب جيزان من الببتون العادي (بدون تسليح) فإنها تنهار بشكل مفاجئ حالما تبدأ التشققات بالظهور، وهذا ما يُعرف بالانهيار القصيف Brittle Failure. لذلك يُضاف تسليح فولاذي في منطقة الشد ليحمل كل إجهادات الشد فيتم الحصول على ما يُعرف بالببتون المسلح Reinforced Concrete.

يعمل الفولاذ والببتون بشكل مشترك في منشآت الببتون المسلح حيث إن ميزات كل منهما تغطي سيئات الآخر. فمثلاً مقاومة الشد في الفولاذ تعادل تقريباً (100-140) مرة من مقاومة الشد في الببتون الاعتيادي. إن مشكلة الفولاذ هي التآكل Corrosion ولكن الببتون يحيط به معطياً إياه حماية ممتازة. أكثر من ذلك إن مقاومة الفولاذ المكشوف المعرض إلى الحرارة لدرجات الحرارة العالية تقترب من الصفر

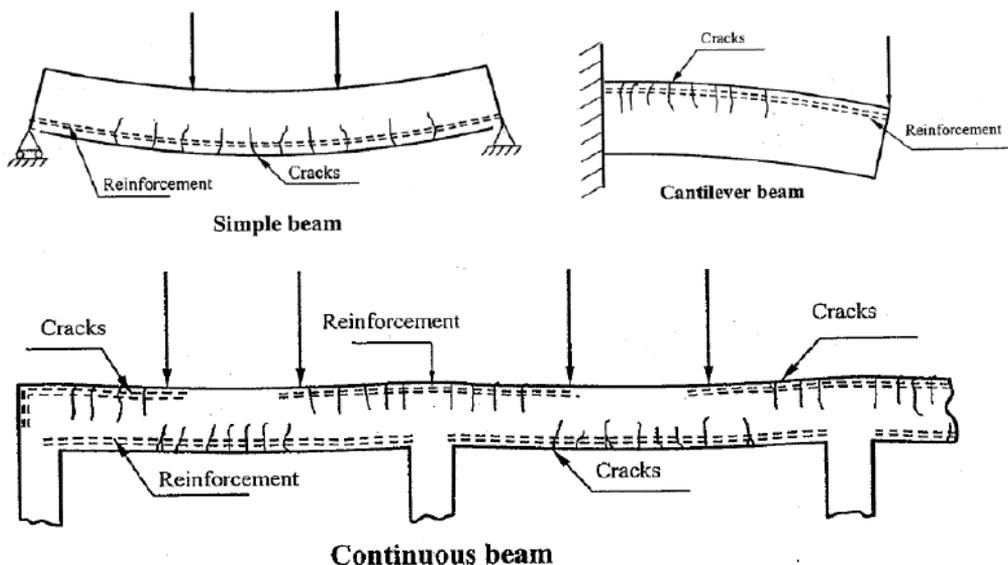
ولكنّ الغلاف البيتوني المحيط به يعطي مقاومة حريق كافية. أخيراً فإنّ البيتون والفولاذ يعملان بشكل جيد في أجواء متغيرة الحرارة بسبب كون معامل التمدد الحراري متساوي تقريباً في المادتين حيث يساوي حسب الكود العربي السوري إلى $\alpha = 10^{-5}$ للدرجة المئوية الواحدة، أي تمدد 0.01mm في المتر الطولي لكل درجة مئوية.



الشكل (2-1) أشكال الجيزان، مرجع رقم (10)

4-1 سلوك العناصر الإنشائية من البيتون المسلح Reinforced Concrete Elements' Behavior

يتم تثبيت التسليح في المواقع التي تحدث فيها إجهادات الشد التي تؤدي إلى حدوث التشققات (الشروخ)، فمثلاً يثبت التسليح الرئيس في جوائز بسيط بالقرب من الليف السفلي حيث تحدث إجهادات الشد. بينما يثبت التسليح في الظفر بالقرب من الليف العلوي المشدود. ويكون التسليح الرئيس في جوائز مستمر قرب الليف السفلي عند مواضع العزم الموجب في وسط المجازات، ويكون قرب الليف العلوي عند مواضع العزوم السالبة وهي فوق المساند.



الشكل (3-1) سلوك عناصر البيتون المسلح

5-1 الخصائص الميكانيكية للبيتون :Mechanical Properties of Concrete

1-5-1 مقاومة الضغط Compressive Strength

هناك العديد من العوامل التي تؤثر على مقاومة الضغط في البيتون منها نسبة الماء إلى الإسمنت W/C، نوع الإسمنت، مواصفات الحصى، عمر البيتون وزمن المعالجة بالماء. إن أهم عامل من هذه العوامل هو نسبة الماء إلى الإسمنت، كلما كانت منخفضة مع رج ومعالجة جيدين كلما كانت مقاومة الضغط في البيتون عالية. فمثلاً بزيادة نسبة الماء إلى الإسمنت W/C من 0.45 إلى 0.65 تتخفض مقاومة الضغط بمقدار 30-40%. هناك إضافات ملدنة Super plasticizer تسمح بمزج خليط بيتون بلدونة عالية بدون زيادة نسبة الماء إلى الإسمنت.

تحدّد المقاومة على الضغط باختبار عينات اسطوانية عمرها 28 يوم وقطرها 15cm وارتفاعها 30cm ويتم تعريضها إلى حمل ضغط ستاتيكي (تدريجي) إلى أن تنهار وذلك بوضعها بين مكسبين مستويين متوازيين متقابلين المكبس العلوي يتحرك نحو الأسفل ضاغطاً العينة (غالباً مكبس هيدروكهربائي).

• المقاومة المميزة الاسطوانية للبيتون Cylinder Characteristic Strength

تسمى أيضاً درجة الجودة وتحسب من أجل مجموعة من قراءات المقاومة على الضغط على عينات عمرها (28) يوماً محفوظة في الماء بدرجة حرارة قدرها $(20 \pm 2^\circ C)$ وفقاً لنظريات الإحصاء الرياضي حيث تحسب من القانون:

$$f'_c = f'_{cm} - k.S \quad (1-1)$$

ومن أجل تصميم خلطة بيتونية يتم فرض المقاومة المميزة المراد الحصول عليها f'_c وتكون المقاومة المتوسطة التي يجب الحصول عليها عبارة عن المقاومة المميزة الهدف Target مضافاً إليها هامش أمان kS :

$$f'_{cm} = f'_c + k.S \quad (2-1)$$

f'_c : المقاومة الأسطوانية المميزة للبيتون.

$$f'_{cm} = \sum f_i / n$$

f'_{cm} : متوسط مقاومات العينات المختبرة

n : عدد العينات بحيث لا يقل عن 15 عينة في حال تصميم الخلطة و30 عينة في حال ضبط الجودة.

S : الانحراف المعياري للعينات Standard Deviation.

تعطى قيمة الانحراف المعياري بالمعادلة:

$$S = \sigma = \sqrt{\frac{\sum (f'_{cm} - f_i)^2}{n-1}} \geq 3 \quad (3-1)$$

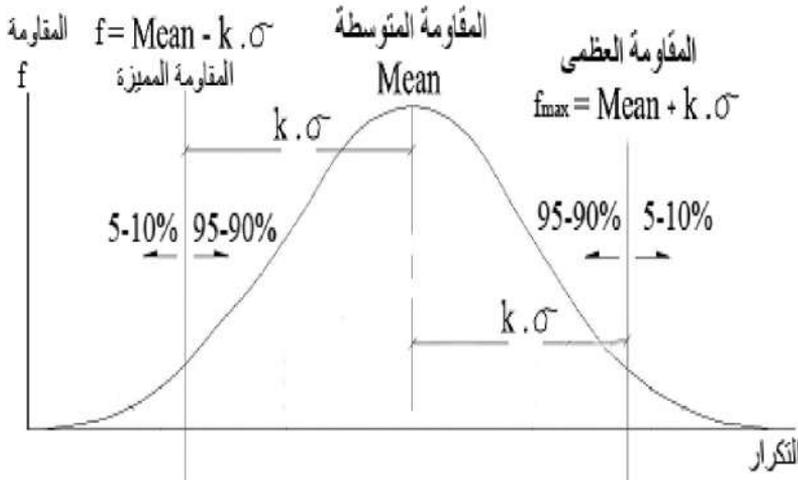
f'_i : مقاومة العينة الأسطوانية بعد 28 يوم.

k : معامل يتعلق بعدد العينات وياحتمال حدوث مقاومة أقل من المقاومة المميزة.

يمكن اعتبار هذا الاحتمال مساوياً إلى 20% في المباني العادية و10-15% في المباني العامة والمنشآت المدنية و5% في المباني التي تحتاج إلى دقة كبيرة كالأبراج والمباني العالية. تؤخذ k من الجدول (1-1) في حال كون عدد الاختبارات يساوي إلى 10.

الجدول (1-1) المعامل k

5%	10%	15%	20%	احتمال حدوث مقاومة أقل من المقاومة المميزة
1.81	1.37	1.09	0.88	المعامل k



الشكل (4-1) منحنى التوزيع الاحتمالي الطبيعي للمقاومة المميزة

أما إذا قل أو زاد عدد العينات على 10 فتؤخذ قيمة k من الجدول (2-1).

الجدول (2-1) قيم المعامل k من أجل عدد اختبارات معين

احتمال حدوث مقاومات أقل من المقاومة المميزة						عدد الاختبارات
25%	20%	15%	10%	5%	2.5%	

قيم نظرية لا تستعمل	0.76	0.98	1.25	1.64	2.35	3.18	3
	0.74	0.94	1.19	1.53	2.13	2.78	4
	0.73	0.92	1.16	1.48	2.02	2.57	5
	0.72	0.91	1.13	1.44	1.94	2.45	6
	0.71	0.9	1.12	1.42	1.9	2.36	7
	0.71	0.89	1.11	1.4	1.86	2.31	8
	0.7	0.88	1.10	1.38	1.83	2.26	9
قيم تستعمل بحذر	0.7	0.88	1.09	1.37	1.81	2.23	10
	0.69	0.87	1.07	1.34	1.75	2.13	15
	0.69	0.87	1.06	1.32	1.73	2.09	20
	0.68	0.86	1.06	1.32	1.71	2.06	25
	0.68	0.85	1.05	1.31	1.7	2.04	30
	0.67	0.84	1.04	1.28	1.65	1.96	> 30

يمكن اعتماد القيمة $k=1.31$ إذا كان عدد الاختبارات لا يقل عن الثلاثين من أجل احتمالية 10%، ويمكن اعتماد القيمة $k=1.34$ إذا كان عدد الاختبارات لا يقل عن خمسة عشر من أجل احتمالية 10%. أما إذا كان إنتاج البيتون لا يتم بمجبل مركزي، أو كان يتم بمجبل مركزي لا يحوي سجلات لنتائج الكسر، فيمكن حساب المقاومة المتوسطة التي يجب الحصول عليها من أجل مقاومة مميزة لا تقل عن 15MPa من العلاقة:

$$f'_{cm} = f'_c + 8MPa \quad (4-1)$$

وكبديل عن هذه العلاقة يمكن اعتماد المقاومة المتوسطة المطلوبة مساويةً إلى 1.25 مرة من المقاومة المميزة المطلوبة.

كما يمكن في بعض الحالات الخاصة التي يعود تقديرها للمهندس المسؤول قبول نسب الخلطة التصميمية إذا كان متوسط نتائج الأسطوانات المختبرة بعد 7 أيام من الصب وعددها لا يقل عن خمس عشرة محققاً للعلاقة (وذلك للخرسانة المصنعة من الإسمنت البورتلاندي ذي التصلب الطبيعي):

$$\bar{f}'_{c7} = 0.7(f'_c + 1.34S_{15}) \quad (5-1)$$

مثال تطبيقي (1-1):

تمّ صب خمس عشرة عينةً من البيتون المسلح بغية حساب المقاومة المميزة لها على الضغط f'_c فكانت نتائج مقاومات العينات في الشروط النظامية بالمختبر كما في الجدول، والمطلوب حساب المقاومة المميزة من أجل مبانٍ عادية ومن أجل منشآت هامة.

التاريخ	المقاومة المطلوبة	هبوط المخروط	درجة الحرارة	f'_7	f'_{28}
10/3/2011	20	75	23	15.4	27.8
10/3/2011	20	75	25	16.1	29.4
10/3/2011	20	90	22	15.6	31.1
14/3/2011	20	95	25	15.4	27.3
14/3/2011	20	60	25	16.9	29.2
14/3/2011	20	75	24	16	26.3
17/3/2011	20	80	26	16.4	26.5
17/3/2011	20	125	26	14.1	23.4
17/3/2011	20	120	26	15	25.7
22/3/2011	20	80	24	13.3	23.3
22/3/2011	20	70	24	14.8	23.3
22/3/2011	20	75	25	14.9	25
23/3/2011	20	70	27	14.1	25.7
23/3/2011	20	65	27	13.5	26.1
23/3/2011	20	80	26	16.4	26.5

الحل:

1- المقاومة المتوسطة:

$$f'_{cm} = \sum f_i / n = 26.44 \text{MPa}$$

2- الانحراف المعياري:

f'_{28}	$ \Delta f'_i $	$(\Delta f'_i)^2$
27.8	1.364286	1.861276
29.4	2.964286	8.78699
31.1	4.664286	21.75556
27.3	0.864286	0.74699
29.2	2.764286	7.641276

26.3	0.135714	0.018418
26.5	0.064286	0.004133
23.4	3.035714	9.215561
25.7	0.735714	0.541276
23.3	3.135714	9.832704
23.3	3.135714	9.832704
25	1.435714	2.061276
25.7	0.735714	0.541276
26.1	0.335714	0.112704
26.5	0.064286	0.004133

$$S = \sigma = \sqrt{\frac{\sum (f'_{cm} - f'_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{72.95}{14}} = 2.28 < 3 \Rightarrow S = 3$$

من أجل مبانٍ عادية يكون احتمال الحصول على مقاومة أقل من المقاومة المميزة مساوياً إلى 20% ويكون المعامل $k=0.87$.

$$f'_c = f'_{cm} - k.S = 26.44 - 3 \times 0.87 = 23.83 \text{MPa}$$

من أجل منشآت مهمة يكون احتمال الحصول على مقاومة أقل من المقاومة المميزة مساوياً إلى 5% ويكون المعامل $k=1.75$.

$$f'_c = f'_{cm} - k.S = 26.44 - 3 \times 1.75 = 21.19 \text{MPa}$$

مثال تطبيقي (2-1) :

أوجد المقاومة الأسطوانية المميزة للعينات المبينة في المثال التطبيقي (1-1) بالاعتماد على المقاومات التي تم الحصول عليها بعد 7 أيام، اعتبر $k=1.34$.

الحل:

تُعطى المقاومة المتوسطة بعد 7 أيام بالعلاقة:

$$\bar{f}'_{c7} = 0.7(f'_c + 1.34S_{15})$$

ويكون:

$$f'_c = \frac{\bar{f}'_{c7}}{0.7} - 1.34S_{15}$$

أ. المقاومة المتوسطة: $\bar{f}'_{c7} = \sum f_i / n = 15.107MPa$

ب. حساب الانحراف المعياري:

f'_7	$ \Delta f'_i $	$(\Delta f'_i)^2$
15.4	0.292857	0.085765
16.1	0.992857	0.985765
15.6	0.492857	0.242908
15.4	0.292857	0.085765
16.9	1.792857	3.214337
16	0.892857	0.797194
16.4	1.292857	1.67148
14.1	1.007143	1.014337
15	0.107143	0.01148
13.3	1.807143	3.265765
14.8	0.307143	0.094337
14.9	0.207143	0.042908
14.1	1.007143	1.014337
13.5	1.607143	2.582908
16.4	1.206667	1.456044

$$S = \sqrt{\frac{\sum (f'_{cm} - f'_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{16.669}{14}} = 1.091 < 3 \Rightarrow S = 3$$

ج. المقاومة المميزة:

$$f'_c = \frac{\bar{f}'_{c7}}{0.7} - 1.34S_{15} = \frac{15.193}{0.7} - 1.34(3) = 17.684MPa$$

يُلاحظ أن قيم المقاومات بعد 7 أيام لم تعط صورة كافية عن المقاومات بعد 28 يوم ذلك لأن البيتون يكتسب قدرًا لا بأس به من المقاومة خلال الأسابيع الثلاثة التالية للأسبوع الأول.

• عوامل تصحيح مقاومة الضغط:

○ شكل العينة:

قد يجري الاختبار على عينات موشورية أو مكعبية وبالتالي للحصول على المقاومة المميزة يؤخذ الجداء بمعامل تصحيح الشكل كما هو وارد في الجدول (3-1).

الجدول (3-1) معاملات تصحيح الشكل

معامل التصحيح	أبعاد عينة الاختبار بالمليمتر بفرض أنها ذات أسطح مستوية ومتوازية	شكل العينة
1.00 0.97 1.05	ارتفاع 300 قطر 150 مم ارتفاع 200 قطر 100 مم ارتفاع 500 قطر 250 مم	الأسطوانة
1.00 1.05 1.05	150×150×300 مم 150×150×150 مم 200×200×200 مم	الموشور
0.78 0.80 0.83 0.90	100×100×100 مم 150×150×150 مم 200×200×200 مم 300×300×300 مم	المكعب

○ كذلك الأمر إذا تم إجراء الاختبار على عينات عمرها يزيد أو يقل عن 28 يوم فيتم الجداء بمعامل تصحيح العمر من الجدول (4-1).

الجدول (4-1) معاملات تصحيح العمر

عمر الخرسانة باليوم	3	7	28	60	90	>360
إسمنت بورتلاندي عادي	2.50	1.05	1.00	0.95	0.90	0.8
إسمنت بورتلاندي سريع التصلب	1.80	1.30	1.00	0.97	0.95	0.90

• مقاومة الضغط حسب الاستعمال:

كما تم ذكره سابقاً فإن مقاومة الضغط تسمى بدرجة جودة الببتون وتعطى الرمز Cx حيث x هي المقاومة الأسطوانية المميزة مقدرة بوحدة MPa. تأخذ درجة جودة الببتون القيم الواردة في الجدول (5-1) حسب نوع الخرسانة.

الجدول (5-1) درجة جودة الببتون

			C45	C40	C35	C30	C25	C20	C18	خرسانة مسلحة RC
C60	C55	C50	C45	C40	C35	C30				خرسانة سابقة الإجهاد PS

في حين تستخدم المقومات المميزة التي تتجاوز 40MPa في أعمدة الأبنية شاهقة الارتفاع وخصوصاً في الطوابق السفلى.

ويبين الجدول (6-1) عيار الإسمنت المستعمل من أجل خلطة كل درجة جودة في حالة البيتون غير المراقب بشكل دقيق:

الجدول (6-1) عيار الإسمنت حسب درجة جودة البيتون

450	400	350	300	250	200	150	100	كمية الإسمنت kg/m ³
C25	C20	C18	C15	C12	C10	C8	C5	درجة جودة الخرسانة
25	20	18	15	12	10	8	5	المقاومة الأسطوانية المميزة MPa
خرسانة مسلحة			خرسانة عادية			نظافة تحت الأساسات		مجالات الاستعمال
مع ضرورة إضافة ملدنات عالية الجودة super plasticizer وسيليكا فوم silica fume								

أما من أجل البيتون المراقب بشكل دقيق يمكن اعتماد القيم الواردة في الجدول (7-1).

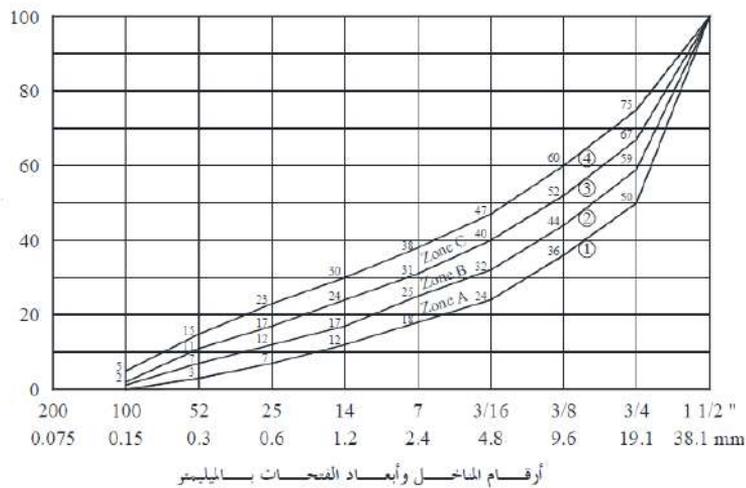
الجدول (7-1) عيار الإسمنت من أجل بيتون مراقب

450		400		350	300	كمية الإسمنت kg/m ³	
C45	C40	C35	C30	C25	C20	C18	درجة جودة الأسطوانة
45	40	35	30	25	20	18	المقاومة الأسطوانية المحتملة

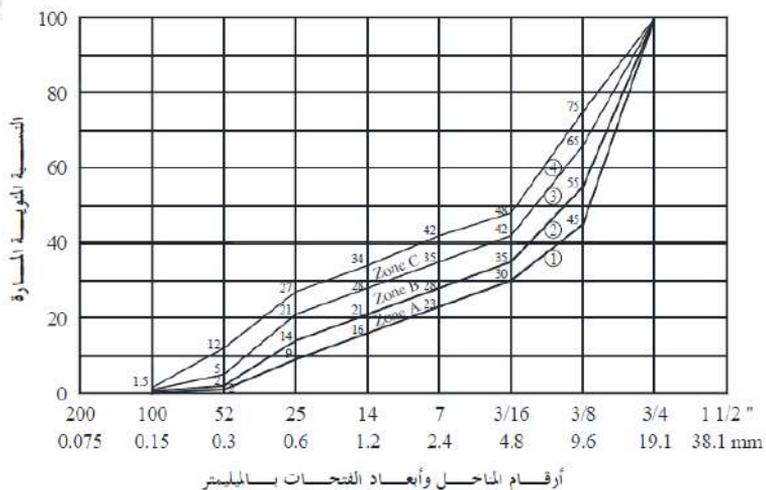
• شروط البيتون المراقب:

- يُقصد بالبيتون المراقب التأكد من إجراء الأمور التالية في أثناء تصنيع البيتون:
- a. تقسيم الركام (الحصى) إلى عدة حجوم: رمل، بحص ناعم، بحص خشن.

- b. استعمال العيارات الوزنية للركام بحيث يكون منحنى التدرج الحبيبي ضمن حزمة المنحنيات المبينة بالشكل (5-1)، (6-1).
- c. قياس نسبة رطوبة الركام قبل استعماله في تصنيع الخلطات، وأخذ هذه النسبة في حساب كمية الماء في الخلطة.
- d. وجود إشراف دائم على عملية التصنيع، بدءاً من العيارات الوزنية وانتهاءً بمعالجة البيتون بالماء بعد صبه، ويشمل ذلك أخذ عينات اسطوانية لضبط الجودة وحفظ هذه العينات ضمن شروط نظامية وتدقيق نتائجها.



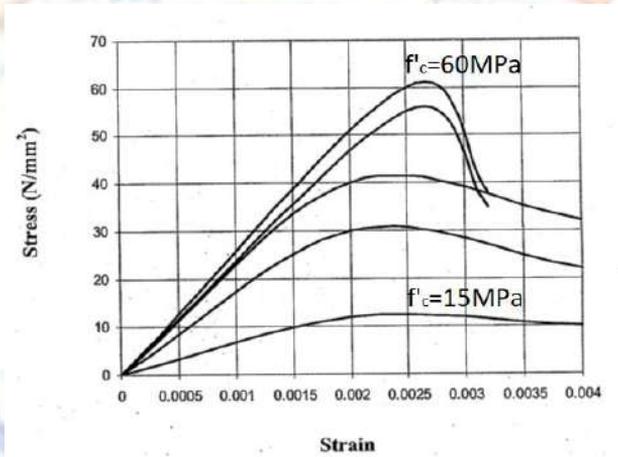
الشكل (5-1) منحنيات التدرج الحبيبي للحصويات بقطر أقل من 38.1 مم



الشكل (6-1) منحنيات التدرج الحبي للحصويات بقطر أقل من 19.1 مم

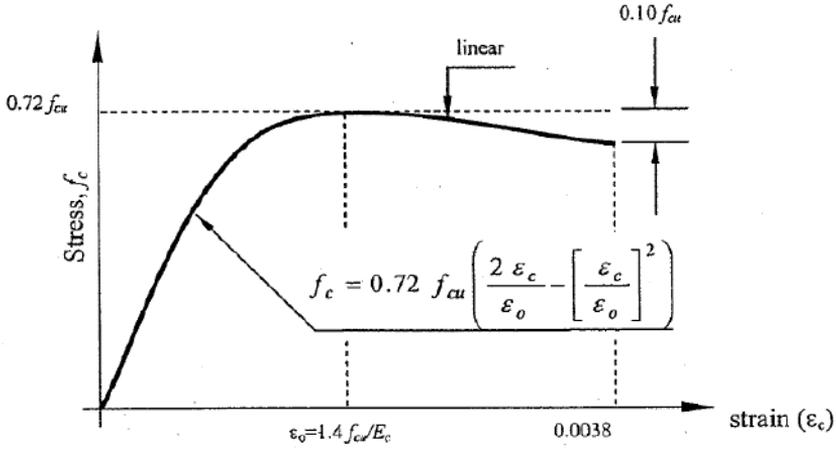
• مخطط إجهاد - انفعال للبيتون:

يبين الشكل التالي مخططات إجهاد - انفعال من أجل مقاومات أسطوانية مميزة مختلفة للبيتون؛ إذ يُلاحظ أن المخطط يتشابه من حيث الشكل العام. فهو يتألف من جزء مستقيم مرن حيث تكون الإجهادات والانفعالات متناسبة، ثم تبلغ الإجهادات قيمتها العظمى من أجل انفعال يتراوح بين (0.002-0.003)، وبعد ذلك تبدأ الإجهادات بالانخفاض بعد بلوغ الذروة. إنَّ البيتون ذو المقاومة المنخفضة أقل هشاشة من المقومات العالية أي أنه يأخذ انفعالات أكبر وتشوهات أكبر قبل الانهيار.



الشكل (7-1) مخطط إجهاد - انفعال للبيتون

يمكن رسم مخطط إجهاد - انفعال بشكل رياضي، بحسب منحنى هورغنستاد المعدل Modified Hognestad Curve حيث يتألف من تابعين رياضيين. الجزء الأول عبارة عن قطع مكافئ والأخر عبارة عن مستقيم مائل.



الشكل (8-1) منحنى هوغستاد المعدل

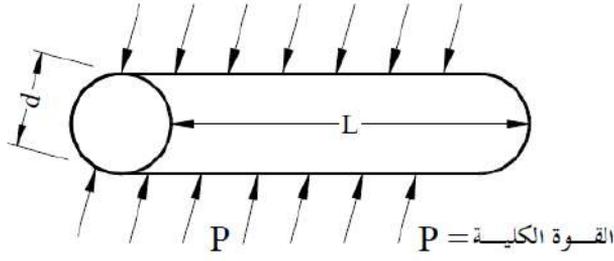
f_{cu} : المقاومة المكعبية للبيتون من أجل مكعبات بأبعاد $150 \times 150 \times 150 \text{mm}$ حيث إنَّها أكبر من المقاومة الأسطوانية بنسبة (1.25).

1-5-2 مقاومة الشد Tensile Strength:

تُظهر الاختبارات أن مقاومة الشد في البيتون متغيرة بشدة وتتراوح بين (8-12%) من مقاومة الضغط حيث تعتمد القيمة الفعلية على نوع الاختبار ونسبة التشققات ونموذج انتشارها. يتم إيجاد مقاومة الشد إما باختبار الشد بالانحناء البسيط Pure Bending Test أو باختبار الشد بالانفلاق Split Cylinder Test.

a. اختبار الشد بالانفلاق Split Cylinder Test:

يجري الاختبار على قوالب أسطوانية قياسية قطرها 150mm وطولها 300mm وعمرها 28 يوم. وذلك بتعريضها للانفلاق بواسطة حملي ضغط متساويين يعملان على رأسين متقابلين على طول مولدين متقابلين للأسطوانة.



الشكل (9-1) اختبار الشد بالانفلاق على عينات أسطوانية

وتُحسب مقاومة الشد بالانفلاق من العلاقة:

$$f_{sp} = \frac{2P}{\pi dL} \quad (6-1)$$

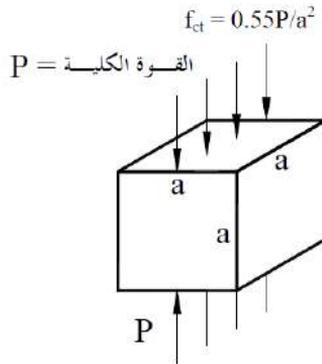
P: حمل الكسر المستعمل.

L: طول عينة الاختبار 300mm.

- تكون مقاومة البيتون للشد مساوية إلى (0.85) من مقاومة الشد بالانفلاق:

$$f_{ct} = \frac{0.55P}{dL} \quad (7-1)$$

- وإذا كانت العينة المختبرة مكعبية، تحسب مقاومة البيتون على الشد بالانفلاق من العلاقة:



الشكل (10-1) اختبار الشد بالانفلاق على عينات موشورية

$$f_{sp} = \frac{2P}{\pi a^2} \quad (8-1)$$

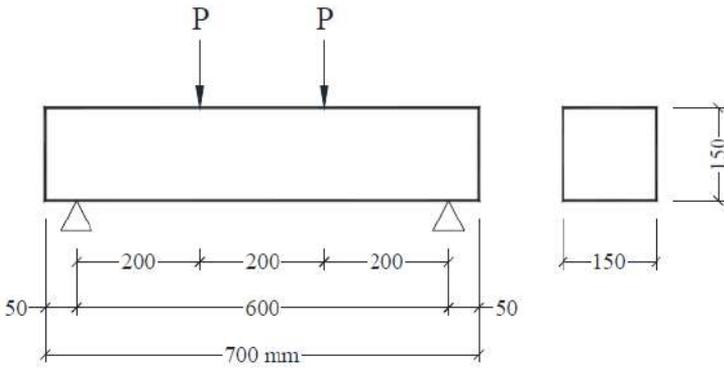
a: طول ضلع المكعب.

- تكون مقاومة البيتون للشد مساوية إلى (0.85) من مقاومة الشد بالانفلاق:

$$f_{ct} = \frac{0.55P}{a^2} \quad (9-1)$$

b. اختبار الشد بالانحناء البسيط :Pure Bending Test

يُجرى على عيّنات موشورية مقطوعها 100×100mm أو 150×150mm بطول 700mm، محملة بحملين متساويين ومتماثلين يبعد كل منهما عند المسند 150mm أو 200mm.



الشكل (11-1) اختبار الشد بالانحناء البسيط

وبذلك تكون مقاومة الشد بالانحناء f_{cb} لمقطع مربع:

$$f_{cb} = \frac{6M_u}{b^3} \quad (10-1)$$

M_u : عزم الانعطاف اللازم لكسر العينة.

b : طول ضلع مقطع العينة (mm).

- تكون مقاومة البيتون للشد مساوية إلى (0.6) من مقاومة الشد بالانحناء:

$$f_{ct} = \frac{3.6M_u}{b^3} \quad (11-1)$$

عند إجراء أي اختبار من اختبارات الشد لبيتون ذي عمر مختلف عن (28) يوم فإن نتائج الاختبار تضرب بمعامل تصحيح يؤخذ من الجدول (8-1).

الجدول (8-1) معامل تصحيح العمر

عمر الببتون باليوم	3	7	28	90	360 أو أكثر
إسمنت بورتلاندي عادي	2	1.4	1	0.95	0.9
إسمنت بورتلاندي سريع التصلب	1.5	1.2	1	0.95	0.9

c. مقاومة الشد بالاعتماد على المقاومة المميزة على الضغط:

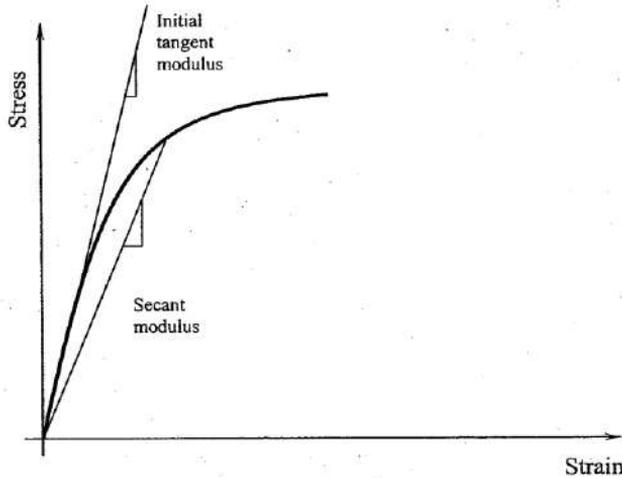
يُعطى الكود السوري مقاومة الشد بناءً على المقاومة المميزة بالعلاقة التالية:

$$f_{ct} = 0.44\sqrt{f'_c} \quad (12-1)$$

f'_c : المقاومة الأسطوانية المميزة على الضغط مقدرة بوحدة MPa.

1-5-3 معامل المرونة الطولاني Modulus of Elasticity:

من الواضح من مخطط إجهاد - انفعال للببتون أنّ العلاقة بين الإجهاد والانفعال غير خطية وتتغير قيمة معامل المرونة الطولاني من نقطة إلى أخرى. وأكثر من ذلك فإنها تتغير من أجل عوامل مختلفة مثل مقاومات الببتون المختلفة وعمر الببتون ونوع التحميل ... الخ. أحياناً تتم الاستعانة بقيمة Tangent الابتدائية للحصول على قيمة معامل المرونة الطولاني.



الشكل (12-1) معامل المرونة الطولاني في الببتون

تُعطى قيمة معامل المرونة الطولاني في الكود السوري كما يلي:

- في حالة الأحمال اللحظية أو المتغيرة سريعاً، وعندما تكون إجهادات التشغيل أقل من 55% من مقاومة الكسر في تلك اللحظة f'_{cj} يؤخذ معامل المرونة الطولاني من العلاقة:

$$E_{co} = 5700\sqrt{f'_{cj}} \quad (13-1)$$

E_{co} : معامل المرونة الطولاني اللحظي الأولي مقدراً بوحدة MPa.

f'_{cj} : مقاومة البيتون الأسطوانية على الضغط في نفس اليوم الذي تمّ حساب معامل المرونة الطولاني فيه مقدرة بوحدة MPa.

z: عمر البيتون زيوماً.

- في حالة الأحمال ذات الأجل الطويل والمطبقة بعد فك القوالب مباشرة، وعدم وجود تسليح للضغط في المقاطع المعرضة لعزوم الانعطاف يجوز أخذه من العلاقة:

$$E_c = 1900\sqrt{f'_{cj}} = \frac{1}{3} E_{co} \quad (14-1)$$

- في الأحوال العادية يؤخذ معامل المرونة الطولاني طويل الأمد مساوياً إلى E_{co} مقسوماً على $(1 + \alpha)$ حيث تحسب α من العلاقة:

$$\alpha = \frac{\xi}{1 + 50 \frac{A'_s}{bd}} \quad (15-1)$$

A'_s : مساحة تسليح الضغط في المقطع، عند منتصف المجاز للجيزان البسيطة أو المستمرة وعند المسند في الجائز الظفري.

b : عرض المقطع المستطيل أو عرض جذع المقطع في المقاطع بشكل T أو I.

d : الارتفاع الفعال للمقطع وهو عبارة عن كامل الارتفاع مطروحاً منه مسافة التغطية إلى محور التسليح السفلي.

ξ : معامل تجريبي يتعلق بمدة التحميل للأحمال الدائمة المطبقة التي انقضت وقت حساب السهم، وذلك عندما يكون عمر البيتون عند بدء تطبيق الأحمال لا يتعدى الثلاثة أشهر، ويؤخذ على الشكل التالي:

- | | |
|-----|-------------------------------|
| 2 | للتحميل لمدة 3 سنوات أو أكثر. |
| 1.4 | للتحميل لمدة سنة واحدة. |
| 1.2 | للتحميل لمدة نصف سنة. |

1.0 للتحميل لمدة شهر واحد.

وذلك على ألا تقل قيمة α عن 0.8.

1-5-4 معامل التكافؤ n (النسبة المعيارية):

تعرف النسبة المعيارية n بأنها النسبة بين معامل المرونة الطولاني للفولاذ إلى معامل المرونة

الطولاني للبيتون:

$$n = \frac{E_s}{E_c} \quad (16-1)$$

في الأحوال العادية تؤخذ النسبة المعيارية ثابتةً ومساويةً إلى 15. بينما في حال تصميم العناصر الإنشائية التي لا يسمح فيها بوجود شقوق ناتجة عن الشد (مثل خزانات المياه) تؤخذ النسبة المعيارية n مساويةً إلى 10.

1-5-5 معامل المرونة العرضاني (معامل المرونة على القص):

يُعطى بالعلاقة:

$$G = \frac{E_c}{2(1+\nu)} \quad (17-1)$$

1-5-6 معامل التشوه العرضي (نسبة بواسون Poisson's Ratio):

وهو عبارة عن نسبة التشوه العرضي إلى التشوه الطولي في التشوهات المرنة، ويسمى نسبة

بواسون، ويساوي في البيتون إلى:

$$\nu = 0.2 \quad (18-1)$$

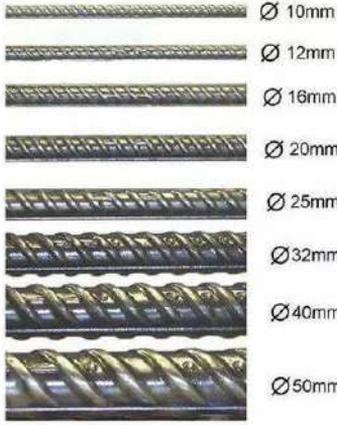
وبالتالي بالتعويض في معادلة معامل المرونة العرضاني يكون:

$$G = 0.417E_c \approx 0.42E_c \quad (19-1)$$

1-6 خصائص فولاذ التسليح:

أكثر أشكال التسليح شيوعاً هو القضبان الفولاذية والشبكات الملحومة. تكون القضبان الفولاذية إما محلزنة أو ملساء حيث تستخدم القضبان المحلزنة بشكل أوسع، لأنها تؤمن التلاحم مع البيتون بشكل جيد، وتصنع بأقطار تتراوح بين 10-40mm. بطول يساوي 12m. تصنف قضبان التسليح بحسب إجهاد الخضوع f_y وبحسب شكل السطح (أملس-محلزن).

أ. فولاذ طري، عادي المقاومة ذو سطح أملس Plain، ويرمز له بالرمز ϕ .



ب. فولاذ طري ، متوسط المقاومة ذو سطح محلزن

Deformed، ويرمز له بالرمز H

ج. فولاذ طري ، عالي المقاومة، مدلفن على البارد

أو على الساخن، ذو سطح محلزن

Deformed، ويرمز له بالرمز T .

د. فولاذ قاس ، عالي المقاومة، مدلفن على البارد،

ذو سطح محلزن Deformed، ويرمز له بالرمز

Y .

الشكل (1-13) أقطار فولاذ التسليح

• الخواص الميكانيكية لفولاذ التسليح:

يتم تمييز أنواع فولاذ التسليح بالخصائص الميكانيكية الآتية:

أ. حد المرونة أو إجهاد الخضوع حيث يوافق تشوهاً متبقياً قدره (0.2%) من الانفعالات الدائمة

ويتراوح بين 240-400MPa.

ب. مقاومة الشد القصوى f_{su} ولا تقل عن $1.25f_y$ وتتراوح بين 370-50MPa.

ج. النسبة المئوية للاستطالة عند الانقطاع عند لحظة الكسر في تجربة الشد ϵ_{su} .

الجدول (1-9) أنواع فولاذ التسليح

النسبة المئوية للاستطالة عند الانقطاع	الحد الأدنى لإجهاد الخضوع أو إجهاد الضمان 0.2% MPa	الحد الأدنى لمقاومة الشد (عند الانقطاع) f_{su} MPa	نوع الفولاذ (الصلب) والرمز	الأسياخ أو القضبان
20*	240	370	فولاذ طري ϕ	ملساء
16*	300	440	فولاذ طري متوسط المقاومة H	ذات نتوءات (ذات أضلاع)
12*	400	500	فولاذ طري عالي المقاومة T	عالية المقاومة ذات نتوءات
10*	400	500	فولاذ قاس معالج على البارد Y	عالية المقاومة ذات نتوءات

ويسمح باعتماد القيمة المحددة في المواصفة القياسية السورية بشرط اعتماد طريقة القياس المرتبطة بها.

- قد يتوفر في الأسواق أحياناً فولاذ أملس $f_y = 280MPa$ وفولاذ ذو نتوءات $f_y = 360MPa$.

إنّ السيئة الكبرى في فولاذ التسليح في عناصر البيتون المسلح هي التآكل، مما يؤدي إلى تشققات كبيرة وتقرش في قشرة البيتون، لذلك تتم زيادة تغطية فولاذ التسليح في البيئات المعرضة للتآكل.

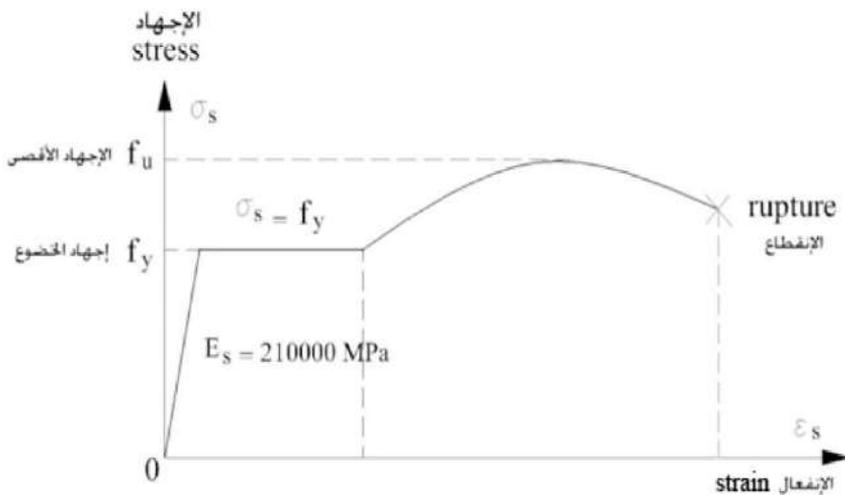
توجد في الأسواق أنواع قضبان تسليح مغطاة بالإيبوكسي Epoxy Coated Bars وهي تعدّ حلاً مثالياً من أجل مشكلة تآكل التسليح حيث يؤمن الإيبوكسي طبقة حماية كافية، إلا أنّها ذات كلفة باهظة وهي أقل كفاءة في تحقيق التلاحم بين الفولاذ والبيتون ليعملان كمادة واحدة، وأيضاً هذه القضبان تحتاج إلى عناية خاصة من أجل حماية طبقة التغليف من الضرر.

• الأقطار المستعملة:

تستعمل الأقطار التالية مقدره بوحدة mm:

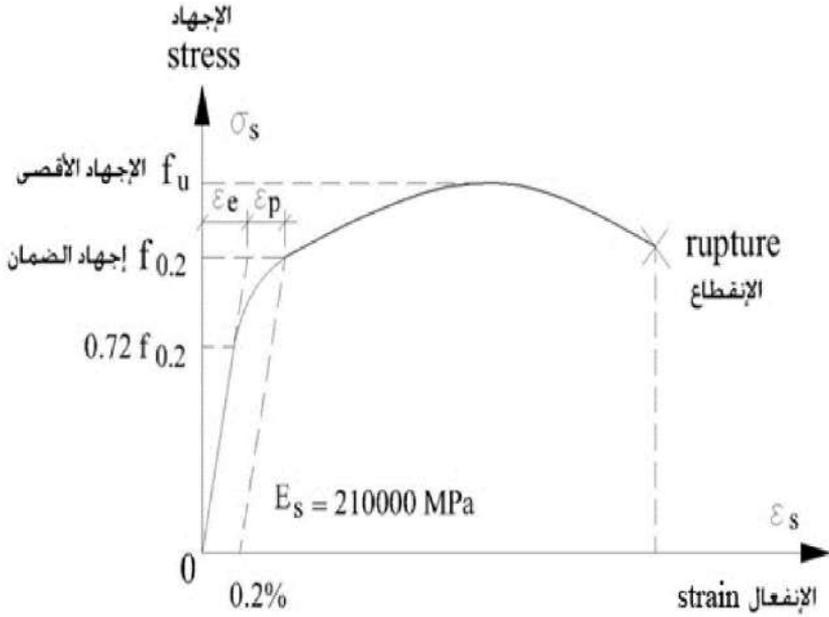
6	8	10	12	14	16	18	20	22	25	28	30	32	35	40
تسليح عرضي														
						تسليح طولي								

- يُعطي الكود السوري مخطط إجهاد - انفعال للفولاذ الطري العادي والعالي المقاومة المعالج على الساخن كما يلي:



الشكل (14-1) مخطط إجهاد - انفعال للفولاذ المعالج على الساخن

- ومخطط إجهاد - انفعال من أجل الفولاذ المعالج على البارد.



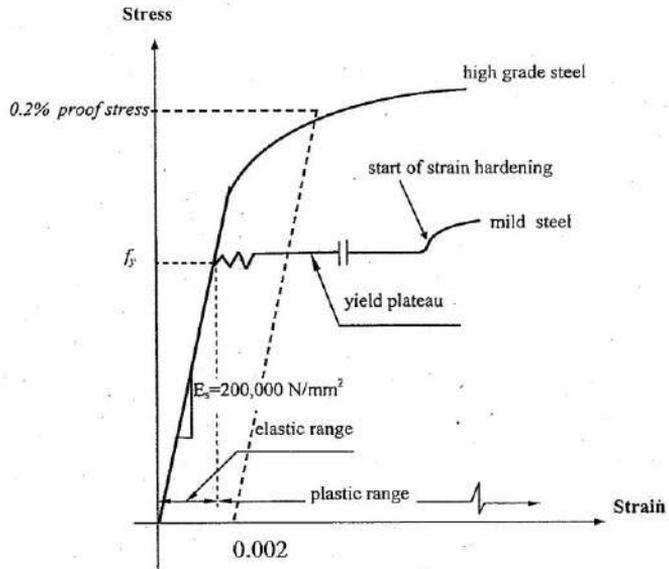
الشكل (1-15) مخطط إجهاد - انفعال للفولاذ المعالج على البارد

- نسبة الكربون في الفولاذ:

إنّ نوع الفولاذ يتعلّق بنسبة الكربون في الفولاذ، فكلما زادت درجة الفولاذ كانت نسبة الكربون أعلى وزادت أيضاً قساوة الفولاذ. ففي الفولاذ الطري تكون نسبة الكربون 0.2-0.3%، في حين تكون في الفولاذ متوسط القساوة mild steel حوالي 0.3-0.4%، بينما تكون في الفولاذ القاسي high grade steel 0.4-0.5%.

- معامل المرونة الطولاني في الفولاذ Modulus of Elasticity:

إنّ معامل المرونة الطولاني في الفولاذ ثابت على خلاف البيتون حيث إنّ منحنى إجهاد- انفعال يتألف من جزء خطّي مرّن وجزء منحنى لا مرّن. ميل المستقيم في المرحلة المرنة يمثل معامل المرونة الطولاني للفولاذ (عامل يونغ) ويتراوح بين $210 \times 10^3 \text{ MPa} \rightarrow 200 \times 10^3$.



الشكل (16-1) معامل المرونة الطولي في الفولاذ



الفصل الثاني الانكماش في البيتون Shrinkage in Concrete

1-2 مقدمة:

ينقص حجم البيتون في أثناء تصلبه؛ بسبب زيادة الماء في الخلطة والذي لا يدخل في التفاعل وإنما يتبخر تاركاً تشققات تسمى تشققات الانكماش. أيضاً نقص المعالجة بالماء يؤدي إلى تبخر ماء الجبل وتشكيل ما يسمى بانفعال الانكماش Shrinkage Strain. يعتمد انفعال الانكماش على عوامل عدة، منها المحتوى الابتدائي للماء في الخلطة والمواد المستخدمة في الخلطة ورطوبة الجو المحيط وكذلك حجم وشكل العنصر.

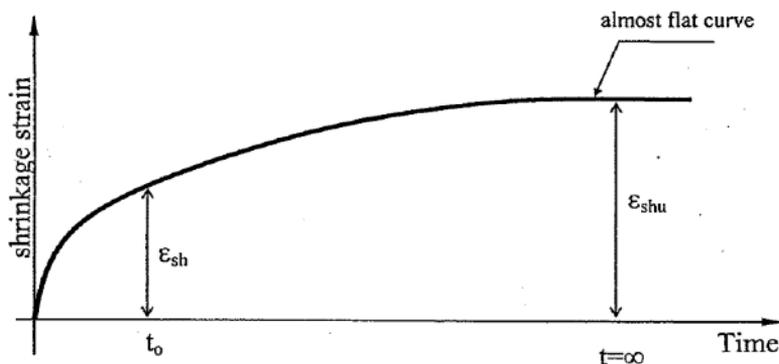
بما أن الانكماش يحصل بسبب نقصان الرطوبة في العنصر فإن الانكماش الداخلي يكون أقل من الانكماش الخارجي في العنصر، وهذا يؤدي إلى إجهادات شد في القشرة الخارجية للبيتون وإجهادات ضغط في جسم البيتون. إن معدل الانكماش يزداد كلما زادت المساحة المعرضة للجو من البيتون حيث يكون ملحوظاً ومؤثراً في المسطحات الكبيرة كأرضيات المنشآت الصناعية والتجارية غير المكسوة بالبلاط وأرصفت الشوارع البيتونية.

2-2 تغير الانكماش مع الزمن:

على الرغم من أن الانكماش يستمر لسنوات عدّة، فإنّه يحدث بنسبة (90%) خلال الأشهر الأربعة الأولى من عمر العنصر، كما في المخطط. تثبت قيمة الانكماش الحاصلة بمضي ثلاث سنوات من عمر العنصر ويصبح المنحني مستقيماً تقريباً وذلك من أجل خليط بيتوني نموذجي. إن التشققات الناتجة عن الانكماش تظهر بشكل تشققات ناعمة وعشوائية على السطح الخارجي للعنصر.

3-2 العوامل المؤثرة على تقلص البيتون:

- أ. عيار الإسمنت: يزداد الانكماش مع زيادة عيار الإسمنت حتى يثبت من أجل 600kg/m^3 ومن الجدير بالذكر أن الإسمنت البورتلاندي العادي يُعطي أقل نسبة انكماش بينما يُعطي الإسمنت سريع التصلب أعلى نسبة انكماش.
- ب. نسبة الماء إلى الإسمنت حيث إن الانكماش يزداد مع زيادة نسبة الماء إلى الإسمنت.



الشكل (1-2) تغير الانكماش مع الزمن

- ج. رطوبة الجو المحيط: يكون الانكماش أقل في الجو الرطب لذلك ينصح برش البيتون المستمر بالماء خلال الفترة الأولى من عمر العنصر.
- د. سمك العنصر: يزداد الانكماش كلما قلت سماكة العنصر ويؤخذ هذا العامل بدلالة السماكة الافتراضية للعنصر Virtual Thickness. يمكن التعبير عن ذلك بأن معدل الانكماش يزداد بزيادة السطح المعرض للهواء.
- هـ. الزمن: يزداد الانكماش مع الزمن ويتم الجزء الأكبر خلال الأشهر الأربعة الأولى.
- و. نوع الركام: يزداد الانكماش كلما خف الوزن النوعي للركام بتعبير آخر فهو يزداد بازدياد نسبة المواد الناعمة.
- ز. نسبة التسليح في المقطع: كلما زادت نسبة التسليح في المقطع البيتوني كان مقدار الانكماش الظاهري أقل؛ وهذا يعود إلى أنّ مادة الفولاذ تعيق عملية التقلص على حساب توليد إجهادات ضغط في الفولاذ وشد في البيتون.

4-2 السماكة الافتراضية للعنصر:

تعرف السماكة الافتراضية للعنصر d_m بأنها النسبة بين مساحة المقطع العرضي للعنصر A إلى نصف محيط المساحة المعرضة مباشرة إلى الوسط الخارجي من العنصر $P/2$.

$$d_m = \frac{2A}{P} \quad (1-2)$$

الجدول (1-2) السماكة الافتراضية للعناصر

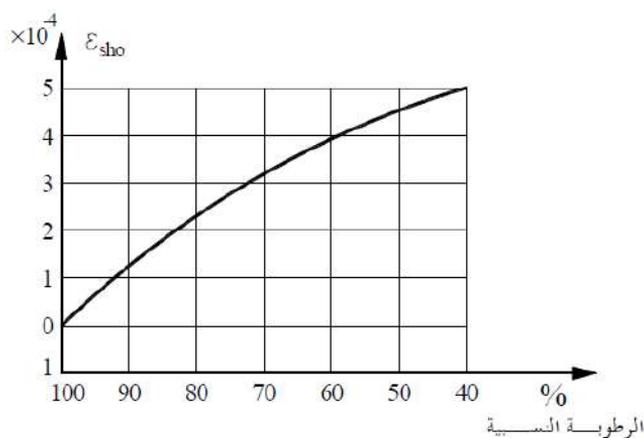
المقطع	السماكة الافتراضية
دائري مصمت قطره R	$d_m = R$
مقطع حلقي سمكه e	$d_m = e$
مقطع مربع ضلعه a	$d_m = \frac{a}{2}$
مقطع مستطيل bxh	$d_m = (b \times h) / (b + h)$
بلاطة رقيقة سماكتها e	$d_m = e$

2-5 حساب قيمة الانكماش النسبي في منشآت البيتون المسلح:

تُعطى قيمة الانكماش في الكود السوري وفق العلاقة التالية:

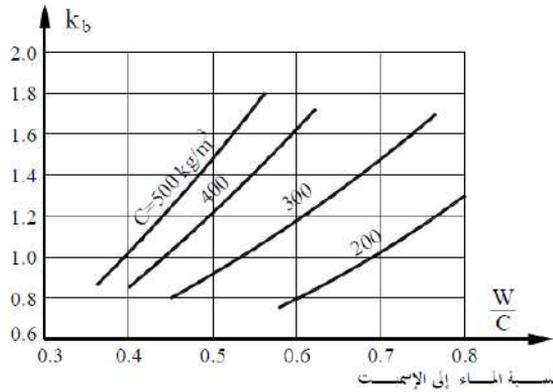
$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sho} [k_b \cdot k_d \cdot k_p \cdot k_t] \quad (2-2)$$

ε_{sho} : قيمة الانكماش الأساسية وتتعلق بقيمة الرطوبة النسبية للوسط المحيط وتتراوح بين (0-0.5mm/m) وتؤخذ من المنحني المبين بالشكل تبعاً للرطوبة النسبية للوسط وتكون في الوسط الجاف حوالي (55%) وفي الوسط الرطب حوالي (75%):



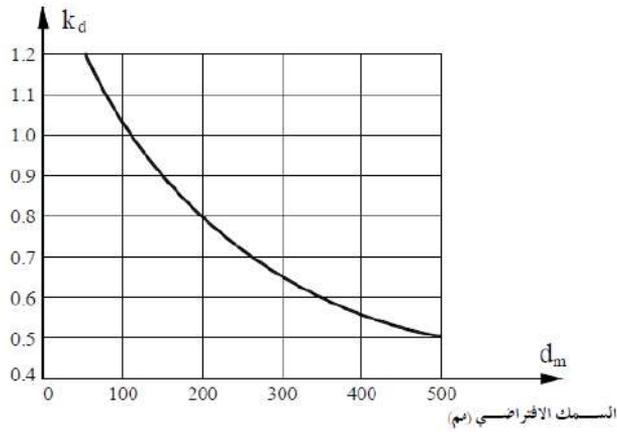
الشكل (2-2) قيمة الانكماش الأساسية

k_b : معامل يتعلق بعيار الإسمنت ونسبة الماء إلى الإسمنت، ويؤخذ من المنحني المبين بالشكل (2-3)



الشكل (3-2) معامل عيار الإسمنت ونسبة الماء إلى الإسمنت

k_d : معامل يتعلق بالسماكة الافتراضية للعنصر البيتوني، وتؤخذ من الجدول (1-2).



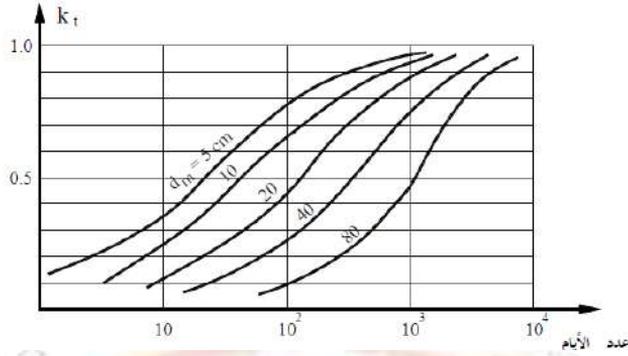
الشكل (4-2) معامل السماكة الافتراضية

k_p : معامل يتعلق بنسبة التسليح الطولي μ ويُحسب من العلاقة:

$$k_p = \frac{1}{1 + n\mu} \quad (3-2)$$

حيث $n=20$

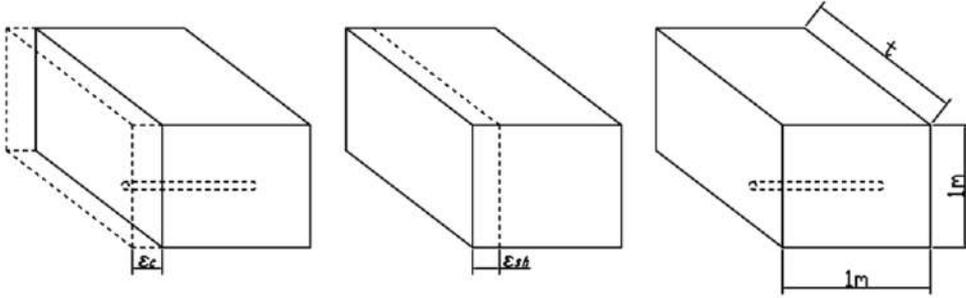
k_t : معامل يتعلق بعمر المنشأة وأبعادها الهندسية، ويؤخذ من المنحني المبين بالشكل:



الشكل (5-2) معامل عمر المنشأة وأبعادها الهندسية

6-2 حساب الإجهادات الناتجة عن الانكماش في البيتون المسلح:

يقوم الانكماش بتقصير البيتون بالنسبة ϵ_{sh} ، بينما وجود التسليح يمنع جزءاً من هذا التناقص قدره $\epsilon_s < \epsilon_{sh}$. فيقصر الفولاذ بنسبة قدرها ϵ_s وبالمقابل يتعرض إلى ضغط قدره f'_s بينما يتناول البيتون بالنسبة $\epsilon_{sh} - \epsilon_s$ ويخضع إلى إجهاد شد قدره f_{ct} .



الشكل (6-2) انفعالات الانكماش

$$\epsilon_c = \epsilon_{sh} - \epsilon_s$$

$$\epsilon_s = \epsilon_{sh} - \epsilon_c$$

$$\frac{f'_s}{E_s} = \epsilon_{sh} - \frac{f_{ct}}{E_c}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c}$$

بشكل رياضي

ولكن

$$f'_s = E_s \left(\epsilon_{sh} - \frac{f_{ct}}{E_c} \right) = E_s \epsilon_{sh} - n f_{ct} \quad (4-2)$$

بتطبيق شرط التوازن يكون الشد الكلي في البيتون مساوياً إلى الضغط الكلي في الفولاذ:

$$A_s f'_s = A_c f_{ct}$$

$$f'_s = \frac{A_c}{A_s} f_{ct}$$

$$f'_s = \frac{f_{ct}}{\mu_s} \quad (5-2)$$

حيث $\mu_s = A_s / A_c$ نسبة التسليح في المقطع.

بتعويض (5-2) في (4-2):

$$\frac{f_{ct}}{\mu_s} = E_s \varepsilon_{sh} - n f_{ct}$$

$$f_{ct} = \frac{\mu_s E_s \varepsilon_{sh}}{1 + n \mu_s}$$

بالإضافة من (5-2) يكون:

$$f'_s = \frac{E_s \varepsilon_{sh}}{1 + n \mu_s} \quad (6-2)$$

من أجل $\varepsilon_{sh} = 4 \times 10^{-4}$ يمكن الحصول على قيم إجهاد الضغط في الفولاذ f'_s وإجهاد الشد في البيتون f_{ct} من أجل قيم مختلفة لنسبة التسليح μ_s كما في الجدول (2-2).

الجدول (2-2) إجهادات الفولاذ والبيتون حسب نسبة التسليح

μ_s %	f_{ct} (MPa)	f'_s (MPa)
1	0.73	73
2	1.3	64.6
3	1.74	57.9
4	2.1	52.5
5	2.4	48

من الجدول يمكن قراءة الملاحظات الآتية:

- تزداد إجهادات الضغط الناتجة عن الانكماش في التسليح كلما نقصت نسبة التسليح.
- تزداد الإجهادات الشادة في البيتون كلما ازدادت نسبة التسليح في العنصر.
- تتعلق قيم الإجهادات الأولية المتولدة في التسليح والبيتون بشكل مباشر وتتناسب طردياً مع تشوهات الانكماش في البيتون العادي ϵ_{sh} .





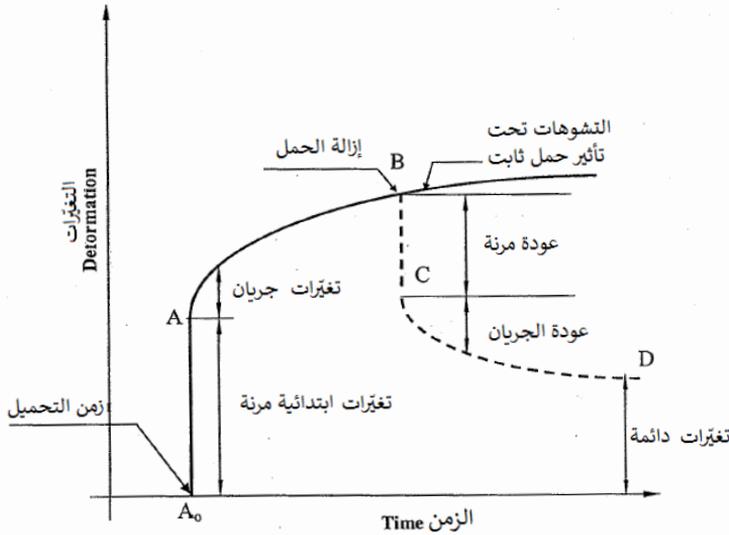
الفصل الثالث الزحف في البيتون Creep in Concrete

1-3 مقدمة:

من المعروف أنه تحدث انفعالات مرنة تحت تأثير الأحمال الثابتة، إلا أنّ مادة البيتون المسلح تميل إلى زيادة هذه الانفعالات مع الزمن أي زيادة الانتقالات النسبية، وهذه الظاهرة تعرف بما يسمّى الزحف أو الجريان وأكثر من ذلك، جزء من هذه الانفعالات متبقي ولا يزول بإزالة الحمولة. لذلك لابد من دراسة هذه الظاهرة والتأكد من كون هذه الانفعالات ضمن الحدود المسوحة.

2-3 آلية حدوث الزحف:

عندما يتم تحميل عنصر من البيتون المسلح، تحصل تغيرات (انفعالات) ابتدائية مرنة Initial Elastic Deformations، تشير الدراسات التجريبية إلى أنّ هذه الانفعالات الأولية تزداد مع الزمن تحت تأثير الحمل الثابت بفعل الزحف. وبالتالي تُقسم الانفعالات النهائية إلى جزأين انفعالات ابتدائية Initial Elastic Deformations وانفعالات تابعة للزمن تسمى انفعالات الزحف أو الجريان Creep Deformations.



الشكل (1-3) انفعالات الزحف

تبدأ تغيّرات الزحف بشكل سريع من النقطة A إلى النقطة B بعد حدوث التغيّرات الابتدائية (من النقطة A₀ إلى النقطة A)، ثمّ يستمر المنحني مع الزمن بمعدّل تزايد منخفض حتى يصبح أفقياً في اللانهاية. تحدث أكثر من (75%) من تغيّرات الزحف خلال السنة الأولى و95% خلال السنوات الثلاث الأولى، إذا ما تمّ تفريغ الحمولة في النقطة B يحدث تراجع للتغيّر بشكل مباشر (النقطة C) وتتبع بتراجع لتغيّرات الجريات حتى النقطة D. يُلاحظ من المنحني في الشكل، أنّ التغيّرات لن تزول كلياً وستبقى تغيّرات (تشوهات) دائمة Permanent Deformations.

3-3 أهم العوامل المؤثرة على الزحف (الجريان):

بغية تقدير قيمة الانفعالات الناتجة عن الزحف لابد من معرفة العوامل الرئيسة التي تؤدي إلى حدوث هذه الظاهرة حيث يمكن إيجازها ضمن ثمانية بنود:

1. مقدار إجهادات التحميل بالنسبة إلى مقاومة العنصر: حيث يزداد الزحف بتزايد إجهادات التحميل.
2. رطوبة الوسط المحيط: إذ يتناقص الزحف بتزايد الرطوبة.
3. عمر البيتون عند التحميل: حيث يتناقص الزحف كلما ازداد عمر البيتون لحظة التحميل.
4. عيار الإسمنت في الخلطة البيتونية: حيث يزداد الزحف بزيادة عيار الإسمنت في المتر المكعب.
5. نسبة ماء الجبل: بتعبير آخر نسبة الماء إلى الإسمنت وزيادتها تؤدي إلى زيادة الزحف.
6. سماكة العنصر البيتوني: حيث إنّ تأثير هذا العامل عكسي كما في حالة الانكماش؛ إذ يزيد الزحف بتناقص السماكة.
7. عامل الزمن: يزداد الزحف مع مرور الزمن حتى يثبت عند عمر ثلاث سنوات.
8. نسبة تسليح الضغط إلى مساحة المقطع العرضي للعنصر.

3-4 حساب الانفعال الناتج عن الزحف:

يمكن تمييز الحالات الآتية:

- أ. في المقاطع المحمّلة محورياً والخاضعة إلى إجهاد ضغط مرن قدره σ'_{ce} وإلى انفعال مرن ϵ_{ce} يكون الانفعال الناتج عن الزحف معطياً بالمعادلة:

$$\varepsilon_{cr} = \phi \varepsilon_{ce} \quad (1-3)$$

ويكون الانفعال الكلي ε_t :

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{ce} + \varepsilon_{cr} = \varepsilon_{ce} (1 + \phi) \quad (2-3)$$

ويقدر معامل الزحف ϕ بالعلاقة التجريبية:

$$\phi = k_c . k_a . k_b . k_d . k_t \quad (3-3)$$

k_c : معامل يتعلق بالرطوبة النسبية للوسط المحيط بالبيتون عند تحميله، الشكل (2-3).

k_a : معامل يتعلق بعمر البيتون لحظة تحميله، الشكل (3-3).

k_b : معامل يتعلق بعيار الإسمنت في المتر المكعب من البيتون ونسبة الماء إلى الإسمنت W/C أيضاً، وهو المعامل ذاته في حساب الانكماش، الشكل (2-3).

k_d : معامل يتعلق بالأبعاد الهندسية للعنصر، وهو المعامل ذاته في حساب الانكماش، الشكل (4-2).

k_t : معامل يأخذ بالحسبان ازدياد جريان البيتون مع الزمن، وهو المعامل ذاته في حساب الانكماش، الشكل (5-2).

ب. في المقاطع المعرضة للانعطاف يتم حساب السهم الناتج عن الزحف بضرب السهم الآني بالعامل α ويُعطي في الكود السوري بالمعادلة:

$$\alpha = \frac{\xi}{1 + 50 \frac{A'_s}{bd}} \geq 0.8 \quad (4-3)$$

A'_s : مساحة تسليح الضغط في المقطع، عند منتصف المجاز للجيزان البسيطة أو المستمرة وعند المسند في الجائز الظفري.

b : عرض المقطع المستطيل أو عرض جذع المقطع في المقاطع بشكل T أو I.

d : الارتفاع الفعال للمقطع؛ وهو عبارة عن كامل الارتفاع مطروحاً منه مسافة التغطية إلى محور التسليح السفلي.

ε_c: معامل تجريبي يتعلق بمدة التحميل للأحمال الدائمة المطبقة التي انقضت وقت حساب السهم، وذلك عندما يكون عمر الببتون عند بدء تطبيق الأحمال لا يتعدى الثلاثة أشهر، ويؤخذ على الشكل التالي:

2 للتحميل لمدة 3 سنوات أو أكثر.

1.4 للتحميل لمدة سنة واحدة.

1.2 للتحميل لمدة نصف سنة.

1.0 للتحميل لمدة شهر واحد.

وذلك على ألا تقل قيمة α عن 0.8.

• حيث تُحسب قيمة الانفعال اللحظي في الزمن j من العلاقة الآتية:

$$\varepsilon_{ce} = \frac{\sigma'_{cj}}{E_{cj}} \quad (5-3)$$

σ'_{cj}: قيمة إجهاد الضغط المطبق على الببتون في العمر j.

E_{cj}: عامل المرونة الطولاني للببتون في العمر j يوم ويُعطى بالعلاقة مقدراً بوحدة MPa.

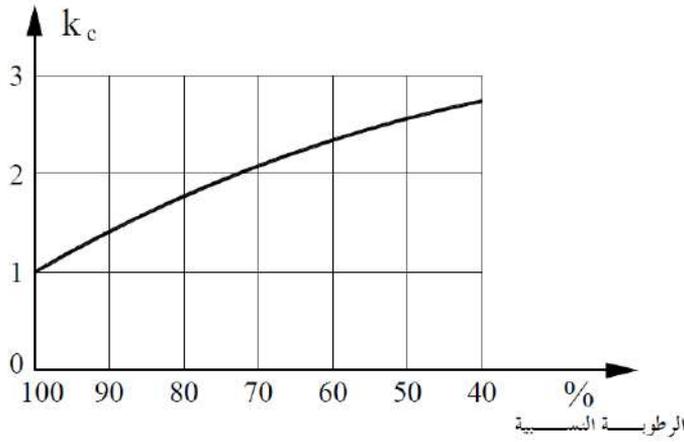
$$E_{cj} = 5700\sqrt{f'_{cj}} \quad (6-3)$$

f'_{cj}: مقاومة الببتون الأسطوانية على الضغط في نفس اليوم الذي تم حساب معامل المرونة

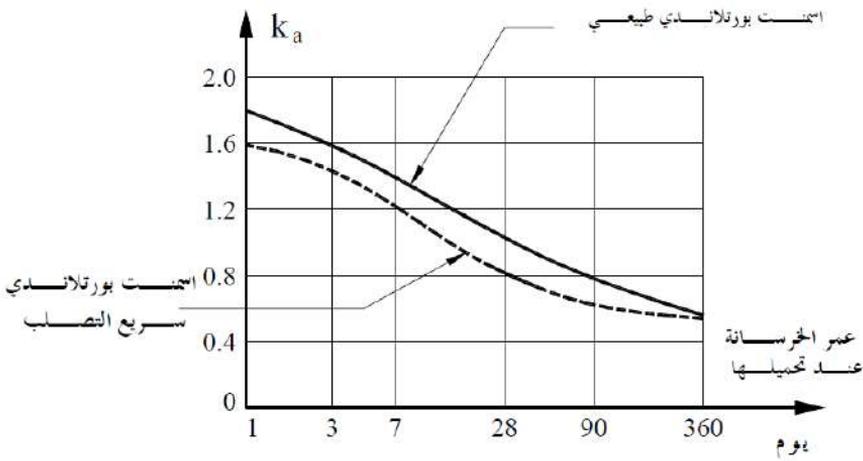
الطولاني فيه مقدرة بوحدة MPa، وتُحسب كما يلي:

$$j > 28 \Rightarrow f'_{cj} = f'_{c28}$$

$$j \leq 28 \Rightarrow f'_{cj} = 0.685f'_{c28} \log(j+1)$$



الشكل (2-3) معامل الرطوبة النسبية والوسط المحيط



الشكل (3-3) معامل عمر الببتون عند تحميله

3-5 تأثير الزحف على معامل التكافؤ:

بما أن معامل المرونة الطولاني معطي بالمعادلة $E_c = \sigma'_c / \varepsilon_c$ فإنه بزيادة الزحف تنقص قيمة معامل المرونة الطولاني بسبب زيادة الانفعال. تُعطي قيمة عامل التكافؤ n بالعلاقة:

$$n = \frac{E_s}{E_c} \quad (7-3)$$

بأخذ تأثير الزحف في الببتون بالحسبان فإنَّ عامل المرونة الطولاني في الببتون يُصبح:

$$E_c = \frac{\sigma'_c}{\varepsilon_t} = \frac{\sigma'_c}{\varepsilon_{ce}(1+\phi)} = \frac{\sigma'_c}{\varepsilon_{ce}(1+\phi)}$$

بالتعويض في معادلة معامل التكافؤ:

$$n = \frac{E_s}{E_c}(1+\phi) \quad (8-3)$$

فإذا كانت قيمة $\phi = 2$ فإن قيمة معامل التكافؤ تتضاعف ثلاث مرات.



الفصل الرابع

طريقة الحدود القصوى في تصميم مقاطع البيتون المسلح

Ultimate Limit State Method for Designing R/C Sections

1-4 مقدمة:

تصمم العناصر من أجل قدرة تحمل تفوق القدرة اللازمة لحمل الحمولات المتوقعة بنسبة معينة. هذه القدرة الزائدة لا تعطي فقط هامش أمان ضد الانهيار بسبب حمل زائد مفاجئ أو سوء تنفيذ، وإنما تؤمن تحكماً كافياً بالإجهادات بحيث تبقى ضمن الحدود من أجل التسهم والتشقق. يسمح الكود السوري بالتصميم وفق إحدى طريقتين هما: طريقة الحدود القصوى وطريقة حدود الاستثمار. علماً أنّ طريقة الحدود القصوى (الطريقة الحديدية) هي الأكثر استخداماً عالمياً منذ حوالي (30) عاماً بسبب كونها أكثر اقتصادية. في حين تُفضل طريقة حدود الاستثمار (الطريقة المرنة) في تصميم المنشآت المعرضة للسوائل مثل خزانات المياه بسبب حساسية تصميم هذه المنشآت ضد التشققات وضرورة تأمين الكتامة.

2-4 طرق الحدود التصميمية Limit State Design Methods:

يظهر مصطلح (الحالة الحديدية) في جميع طرائق التصميم، ويمكن القول: إنه عندما يصل عنصر ما إلى حد يُصبح فيه غير فعالاً بحسب طريقة تصميمه فإنّه يصل إلى الحالة الحديدية. تصنّف الحالة الحديدية في البيتون المسلح إلى ثلاث فئات:

1-2-4 حالة الحد الأقصى Ultimate Limit State:

الحالة الحديدية في طريقة الحدود القصوى تعني: وصول العنصر إلى حالة الانهيار، والتي يجب أن تكون ذات احتمال ضعيف في الحدوث، نظراً لأنها تؤدي إلى خسارة في الأرواح.

2-2-4 حالة حد الاستثمار Serviceability Limit Sate:

إنّ الحالة الحديدية في طريقة حدود الاستثمار تتضمن كل الأمور التي يمكن أن تؤثر على الاستخدام الوظيفي للمنشأ وتصنّف إلى:

• حد التسهم والتشوه Deformation and Deflection Limit State

حيث إنّ التسهم الزائد غير مقبول أن يكون ظاهراً للعيان كما أنّه يتسبب في تشقق الجدران والقواطع.

• حد التشقق Cracking Limit State

تؤدي التشققات الزائدة إلى تسرب الماء إلى التسليح، وبالتالي تآكل حديد التسليح وتلف البيتون.

• حد الاهتزاز Vibration Limit State

إن الاهتزاز الشاقولي للبلاطات والأسقف يمكن أن يسبب مستوى غير مقبول من الإزعاج للسكان.

3-2-4 حالة حد الاستقرار Stability Limit State:

إن الحالة الحديثة في طريقة حدود الاستقرار تتضمن التحنّب Buckling في العناصر المضغوطة، الانقلاب Overturning، الانزلاق Sliding، تشكل مفاصل لدنة Formation of Plastic Hinge حيث إنه في بعض الأحيان يمكن أن يتسبب الانهيار الموضعي لأحد العناصر بانهايار كامل المنشأ، ويسمى هذا النوع من الانهيار بالانهيار التتابعي Progressive Failure ويجب تجنب هذا النوع من الانهيار.

3-4 مواصفات المواد:

إنّ المواصفات الأساسية اللازمة للتصميم وفق طريقة الحدود القصوى هي إجهاد الخضوع في الفولاذ f_y والمقاومة المميزة الأسطوانية في البيتون بعد 28 يوم f'_c . يجدر التنويه أنه يلزم في الحسابات اعتماد قيم مخفضة لإجهاد الخضوع في الفولاذ عن القيمة الإسمية عندما تكون قيمة المقاومة المميزة الأسطوانية في البيتون قليلة نسبياً. يُعطي الكود السوري الجدول (1-4) لقيم f_y المخفضة المعتمدة في الحسابات، وذلك بوحدة $\text{MPa (N/mm}^2\text{)}$.

الجدول (1-4) قيم f_y المخفضة بحسب المقاومة المميزة الأسطوانية

400	360	300	280	240	f_y
					f'_c
		250	240	240	≤ 15
	300	260	250	240	16.5
400	360	300	280	240	≥ 18

4-4 تصنيف الأحمال Classification of loads:

هناك أنواع مختلفة من الأحمال المطبقة على المنشآت من أهمها الأحمال الميتة والأحمال الحية.



1-4-4 الأحمال الميتة Dead Loads

هي عبارة عن أحمال ثابتة في الشدة والموقع على طول عمر المنشأة وبالتالي يمكن تقديرها بدقة معقولة. جزء كبير منها ناتج عن الوزن الذاتي للمنشأ وكذلك الأمر مواد الإكساء في البلاطات Flooring من رمل ميول Leveling Sand والقواطع والجدران Partitions and Walls.

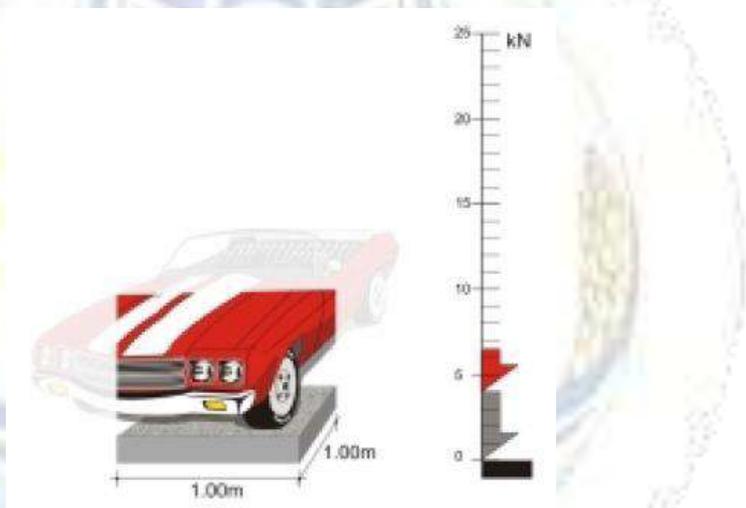
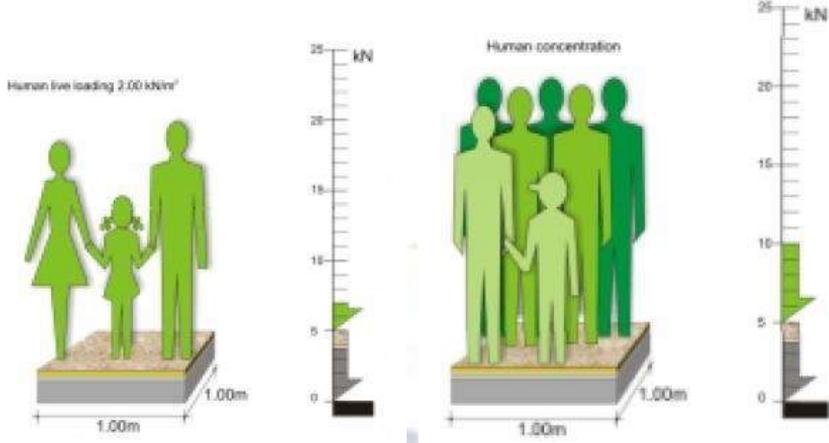
الشكل (1-4) الأحمال في المباني، مرجع رقم (10)

2-4-4 الأحمال الحية Live Loads

تتعتمد بشكل أساسي على نوع استخدام المنشأ حيث تتكون الأحمال الحية من أوزان الساكنين والأثاث والسيارات والعربات. هذه الأحمال متغيرة في المكان والشدة لذلك يجب وضعها بحيث تُعطي أكبر أثر في المنشأ أي أعظم قيم للإجهادات. تتراوح قيم الأحمال الحية بين $1-20\text{kN/m}^2$ بحسب وظيفة المنشأ. وتُعطي بجدول في الكود السوري في الصفحة 72.



الشكل (2-4) الأحمال الحية في المباني، مرجع رقم (10)



الشكل (3-4) الأحمال في المتر المربع، مرجع رقم (10)

4-5 تحقيق الأمان في طريقة الحدود القصوى:

بغية تحقيق الأمان في طريقة الحدود القصوى يتم تخفيض مقاومة العنصر بضربها بمعامل تخفيض مقاومة Ω ، كذلك الأمر يتم تصعيد الأحمال الموجودة بمعاملات خاصة. بالنتيجة يجب أن تكون الأحمال المصعدة أقل من المقاومة المخفضة للعنصر:

$$U \leq \Omega(R_u)$$

تحسب R_u استناداً إلى المقاومة المميزة للمواد.

الجدول (2-4) قيم الأحمال الحية حسب استعمالات البناء

الحمل المركز المطبق على مربع ضلعه 300mm ⁽¹⁾		شدة الحمل الموزع		الغرض من استعمال المبنى	
kgf	kN	kgf/m ²	kN/m ²		
		100	1.0	غير مستعملة (لا يمكن أفقية أو مائلة حتى 10 درجات)	المطبخ
		50	0.5	مائلة أكثر من 10 درجات	
		مثل الطابق المتكرر ولا تقل عن 200	مثل الطابق المتكرر ولا تقل عن 2.0	مستعملة (يمكن الوصول إليها)	
		400	4.0	مباني خاصة	الشرفات
		500	5.0	مباني عامة	
140	1.4	200	2.0	غرف	المباني السكنية
180	1.8	300	3.0	ممرات خارجية ولرأج	
180	1.8	250	2.5	غرف نوم	الفنادق
450	4.5	500	5.0	ممرات خارجية ولرأج	
270	2.7	300	3.0	غرف صفوف وإدارة	المدارس
450	4.5	500	5.0	ممرات خارجية ولرأج	
180	1.8	250	2.5	غرف نوم	المساحي
450	4.5	400	4.0	ممرات خارجية ولرأج	
450	4.5	تحسب ⁽¹⁾ ولا تقل عن 300	تحسب ⁽²⁾ ولا تقل عن 3.0	غرف عمليات	المكاتب
270	2.7	300	3.0	غرف مباني عامة	
270	2.7	200	2.0	مباني خاصة	
تحسب	تحسب	تحسب ولا تقل عن 500	تحسب ولا تقل عن 5.0	أندابير	
تحسب	تحسب	تحسب ولا تقل عن 400	تحسب ولا تقل عن 4.0	غرف حاسوب	
450	4.5	400	4.0	ممرات مباني عامة	
450	4.5	300	3.0	ممرات خارجية ولرأج مباني خاصة	

4-5-1 عوامل تخفيض المقاومة Strength Reduction Factors:

هناك ضرورة تستوجب إدخال عامل تخفيض المقاومة بسبب احتمالات وجود تبسيطات وتقريبات وأخطاء صغيرة تحدث في أثناء الحسابات، بالإضافة إلى الفارق الذي يمكن أن يوجد بين المقاومة الحقيقية والمقاومة المعتمدة في الحسابات.

تُعطى قيم معامل تخفيض المقاومة وفق الكود السوري كما يلي:

- في المقاطع المعرضة إلى الانعطاف البسيط أو إلى قوى شد محورية أو لا محورية: $\Omega = 0.9$

- في المقاطع المعرضة إلى قوى ضغط محوري $\Omega = 0.65$ أساور عادية.
- في المقاطع المعرضة إلى قوى ضغط لا محورية (انعطاف مركب) $0.9 \geq \Omega = 0.9 - 0.5 \frac{N_u}{N_c} \geq 0.65$ وذلك في المرحلة الانتقالية بين منطقة الانهيار بالضغط والانهيار بالشد. حيث N_c مقاومة المقطع البيتوني لوحده $0.85f'_c A_c$.
- في المقاطع المعرضة إلى قص أو فتل أو أحدهما $\Omega = 0.75$.
- N_u : قوة الضغط المصعدة المطبقة على المقطع العرضي.

4-5-2 عوامل تصعيد الحمولات Load Factors:

- من أجل المقاطع التي تحمل أحمالاً ميتة وحية فقط يتم تصعيد هذه الأحمال وفق التركيبين الآتيين:

$$1.4D$$

$$1.4D + 1.7L$$

- عندما يتوجب أخذ أحمال الرياح W بالحسبان، تعتمد نتائج التركيب الأخطر بين التركيبين التاليين:

$$1.2D + 1.6(L_r \text{ or } S) + (f_1 L \text{ or } 0.8W)$$

$$1.2D + 0.5(L_r \text{ or } S) + f_1 L + 1.3W$$

- التركيبان المتعلقان بالزلازل أو الرياح:
التركيب الأساسي:

$$1.1(1.2D \pm E + (f_1 L + f_2 S))$$

$$LL > 5kN/m^2$$

$$1.32D + 1.1E_h + 0.55C_a ID + 1.1 \times L$$

$$1.32D + 1.1E_h - 0.55C_a ID + 1.1 \times L$$

$$1.32D - 1.1E_h + 0.55C_a ID + 1.1 \times L$$

$$1.32D - 1.1E_h - 0.55C_a ID + 1.1 \times L$$

$$LL \leq 5kN / m^2$$

$$1.32D + 1.1E_h + 0.55C_a ID + 1.1 \times 0.5 \times L$$

$$1.32D + 1.1E_h - 0.55C_a ID + 1.1 \times 0.5 \times L$$

$$1.32D - 1.1E_h + 0.55C_a ID + 1.1 \times 0.5 \times L$$

$$1.32D - 1.1E_h - 0.55C_a ID + 1.1 \times 0.5 \times L$$

التركيب الثانوي:

$$1.1(0.9D \pm E \text{ or } 1.18W)$$

$$0.99D + 1.1E_h + 0.55C_a ID$$

$$0.99D + 1.1E_h - 0.55C_a ID$$

$$0.99D - 1.1E_h + 0.55C_a ID$$

$$0.99D - 1.1E_h - 0.55C_a ID$$

D: الحمل الميت.

L: الحمل الحي.

L_r, S: أثر حمل الثلج وأثر الحمل الحي على السطح الأخير بالترتيب.

W: الأفعال الناتجة عن ضغط الرياح بقيمتها المميزة أو الإسمية.

E: أثر حمل الزلازل الناتج عن استعمال الطريقة الستاتيكية المكافئة.

f₁: وتساوي إلى (1) في الأسقف المتكررة في المواقع ذات التجمعات العامة وفي الأماكن التي تتجاوز فيها الأحمال الحية 5kN/m² ومرائب السيارات وتساوي إلى القيمة /0.5/ في باقي الأحمال الحية.

f₂: وتساوي إلى /0.7/ في الأسقف النهائية ذات الأشكال الخاصة (مثل سقف سن المنشار) والتي لا تسمح بطرح الثلج بعيداً عن المنشأ، وتساوي إلى القيمة /0.2/ في باقي أشكال الأسقف.

4-6 المبادئ الأساسية والفرضيات في طريقة الحدود القصوى:

أ. القطاعات المستوية قبل الانحناء تبقى مستوية بعد الانحناء. بتعبير آخر فإن الانفعال في البيتون

المسلح يتناسب خطياً مع البعد عن المحور المحايد.

ب. يؤخذ الانفعال الأقصى في ليف البيتون الأكثر انضغاطاً مساوياً إلى $\epsilon_c = 0.003$.

- ج. تتغير إجهادات الشد والضغط في فولاذ التسليح مع تغير الانفعال حسب منحنيات الإجهاد والانفعال.
- د. كذلك الأمر يؤخذ توزيع الإجهادات في منطقة الضغط من البيتون حسب منحنى الإجهاد والانفعال.
- هـ. يمكن تقريب شكل توزيع إجهادات الضغط على المقطع البيتوني باستعمال توزيع مكافئ على شكل مستطيل حسب Whitney طولها يساوي إلى $a=0.85c$ حيث c هي بعد المحور السليم عن الليف العلوي، وتكون قيم إجهادات الضغط $0.85f_c$ وذلك عندما لا تتجاوز المقاومة المميزة للبيتون 30MPa .
- و. تهمل مقاومة البيتون على الشد كلياً ويُستعاض عنها بالفولاذ في تحمّل إجهادات الشد.
- ز. إنّ الالتحام بين الفولاذ والبيتون تام بحيث يكون الانفعال واحداً في كل نقطة التقاء بينهما.
- ح. محصلة القوى الخارجية تساوي إلى محصلة القوى الداخلية.
- ط. العزم الخارجي المطبق يساوي إلى محصلة العزوم الداخلية.

الفصل الخامس

تصميم المقاطع ذات التسليح الأحادي

Design of Singly Reinforced Sections

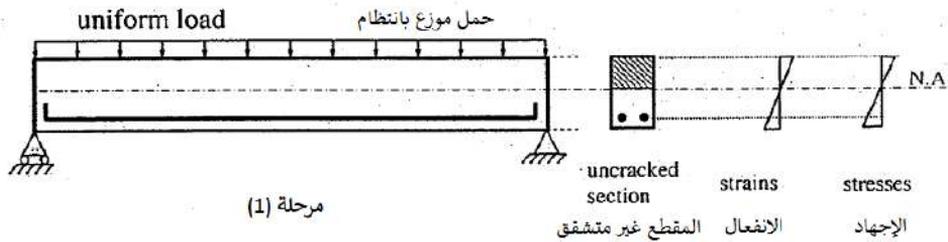
1-5 مقدمة:

توجد هذه المقاطع بكثرة في الجيزان البسيطة أو المستمرة أو في البلاطات الخاضعة إلى حمولات شاقولية في الأبنية. على الرغم من بساطة تصميم هذه المقاطع إلا أنَّ تحليلها يشكل حجر الأساس لعلم البيتون المسلح. هذه المقاطع خاضعة إلى الانعطاف البسيط Pure Bending دون أن يرافقه قوة محورية سواءً ضاغطة أم شادة. يمكن تصنيف المقاطع الخاضعة إلى الانعطاف البسيط إلى مقاطع مستطيلة ومقاطع بشكل T ، والتي قد تكون مسلحة بتسليح أحادي أو تسليح ثنائي حسب الحاجة.

2-5 سلوك جوائز من البيتون المسلح تحت تأثير الانعطاف البسيط Reinforced Concrete Beam Behavior under Pure Bending

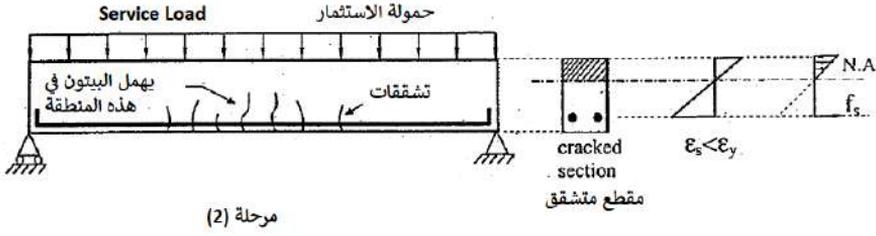
بغية دراسة سلوك الجيزان البيتونية المسلحة تحت تأثير الانعطاف البسيط، يتمُّ تعريض الجوائز إلى حمل موزع بانتظام، وتتمُّ دراسة سلوك الجوائز مع زيادة التحميل، ويتمُّ تمييز المراحل التالية:

أ. يكون كامل المقطع البيتوني فعالاً في مقاومة إجهادات الضغط والشد في الأحمال المنخفضة التي هي أقل من حمولة التشقق. في هذه المرحلة يكون توزيع الانفعالات والإجهادات خطياً على كامل المقطع العرضي.



الشكل (1-5) المقطع البيتوني في المرحلة المرنة

ب. عندما تزداد الحمولة تتجاوز إجهادات الشد في البيتون مقاومة الشد في البيتون وتبدأ تشققات الشد في الظهور؛ إذ إنَّ هذه التشققات صغيرة وغير مرئية بالعين المجردة.

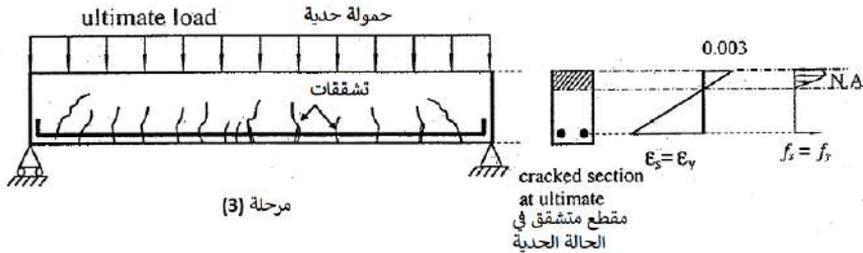


مرحلة (2)

الشكل (2-5) المقطع البيتوني في نهاية مرحلة المرونة

في مواقع التشققات لا ينقل البيتون أي إجهادات شد والفولاذ يحمل كل الشد الواقع تحت المحور المحايد Neutral Axis وبالتالي يتم إهمال جزء البيتون الواقع تحت المحور المحايد بالكامل في حسابات التسليح، بينما يتم تحميل إجهادات الشد كاملةً إلى الفولاذ. في هذه المرحلة تكون الحمولة قد وصلت إلى حالة متوسطة بحيث لا تتجاوز إجهادات البيتون تقريباً ثلث مقاومة البيتون على الضغط، ولا تزال الانفعالات والإجهادات خطية. تسمى هذه المرحلة "مرحلة الاستثمار Serviceability State" وتسمى الحمولة "حمولة الاستثمار Service Load" حيث إن التصميم وفق طريقة حدود الاستثمار (الطريقة المرنة) يفترض وصول العناصر إلى هذه المرحلة.

ج. مع زيادة التحميل تزداد التشققات ويرتفع المحور المحايد باتجاه منطقة الضغط. بالنتيجة تزداد قوى الشد والضغط وتصبح الإجهادات في منطقة الضغط غير خطية. تسمى هذه المرحلة "مرحلة الحد الأقصى Ultimate State". إن مخطط الإجهاد على المقطع في هذه المرحلة لا يبقى خطياً وإنما يصبح قطعياً مشابهاً لمنحني إجهاد - انفعال في البيتون حيث يصل الفولاذ في هذه المرحلة إلى انفعال الخضوع.



مرحلة (3)

الشكل (3-5) المقطع البيتوني في مرحلة التلدن

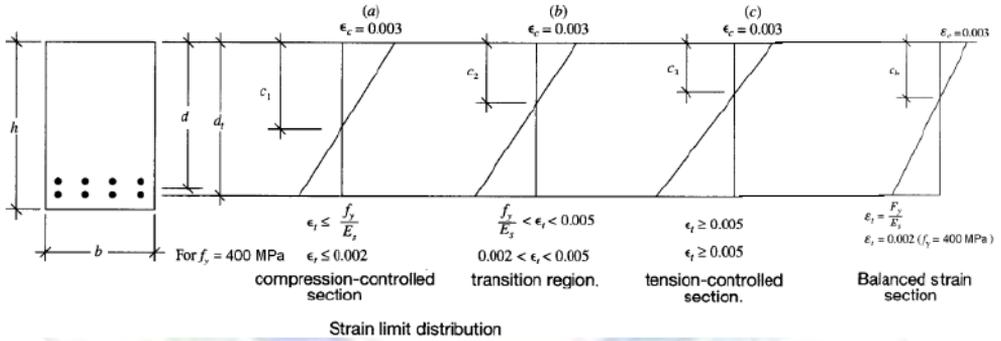
3-5 أنواع الانهيار في المرحلة الحدية :Failure Types at Ultimate Stage

• الانهيار المطواع Ductile Failure:

إذا كانت نسبة التسليح في المقطع صغيرة، فإنّ الفولاذ يتلدن ويخضع البيتون إلى انتقالات كبيرة والكثير من الشقوق، ثمّ ينهار البيتون بعد ذلك. يسمّى هذه النوع من الانهيار الانهيار بسيلان الفولاذ، وهو النوع المفضل لأنّه يحدث ببطئٍ ويعطي مؤشرات سابقة قبل مدة كافية من أجل التدعيم أو الإخلاء.

• الانهيار الهش Brittle Failure:

في هذا النوع من الانهيار يكون المقطع مسلحاً بنسبة تسليح كبيرة. وبالتالي يحدث الانهيار بسبب انسحاق البيتون في منطقة الضغط دون تلدن فولاذ التسليح. وتكون التشققات الحادثة صغيرة ويحدث الانهيار بشكل مفاجئ. هذا النوع من الانهيار غير مفضل لأنّه لا يُعطي إنذاراً كافياً قبل الانهيار الكامل.

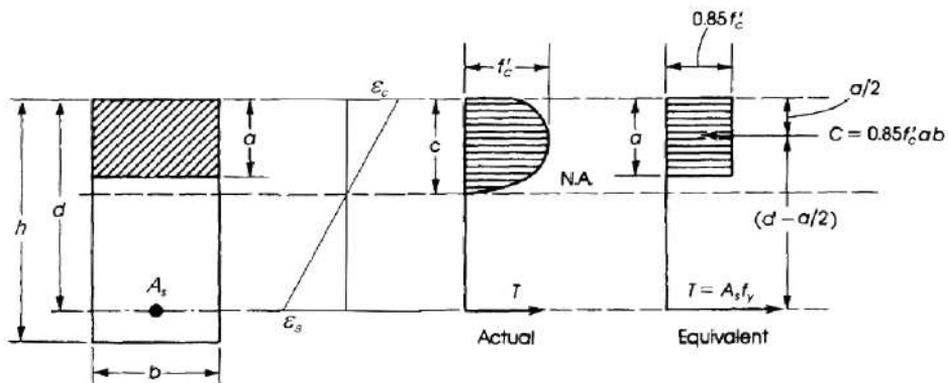


الشكل (4-5) مراحل مخطط الانفعال على المقطع

4-5 توزع الانفعالات والإجهادات في مرحلة الحد الأقصى Stress Distribution at

:Ultimate Stage

كما تبين سابقاً فإنّ توزع الانفعال يكون خطياً في هذه المرحلة مع وصول الانفعال في الفولاذ إلى انفعال الخضوع وتجاوزه. في حين يكون توزع مخطط الإجهاد بشكل قطعي. إنّ إجراء الحسابات من أجل التوزع القطعي مرهق للغاية. لذلك تمّ إلباس الشكل القطعي بمستطيل مكافئ من قبل Whitney كما في الشكل حيث يكون طول المستطيل المكافئ مساوياً إلى $a=0.85c$ ، بينما c هي بعد المحور المحايد عن الليف العلوي، وتكون قيمة الإجهاد مساوية إلى $0.85f_c$.



الشكل (5-5) مخطط الإجهاد ومخطط الانفعال على المقطع في الحالة الحدية

وتساوي محصلة قوى الضغط إلى القوة C الحاصلة في البيتون وتساوي:

$$C = 0.85f'_c ab$$

وتبعد عن الليف العلوي للعنصر مسافة قدرها $a/2 = 0.85 C/2$.

في حين تساوي محصلة قوى الشد في المقطع إلى القوة T الحاصلة في الفولاذ:

$$T = A_s f_y$$

عندما تزيد المقاومة الأسطوانية المميزة للبيتون على 28MPa يصبح طول مستطيل الإجهاد مساوياً $a = \beta_1 c$ حيث تُعطى β_1 كما في الجدول (1-5).

الجدول (1-5) قيم المعامل β_1

f'_c (MPa)	β_1	
$17 \leq f'_c \leq 28$	0.85	A
$28 < f'_c < 55$	$0.85 - \frac{0.05(f'_c - 28)}{7}$	B
$f'_c \geq 55$	0.67	C

5-5 حسابات التسليح في مقطع خاضع إلى انعطاف بسيط ومسلح بتسليح أحادي:

إن تحليل المقاطع الخاضعة إلى الانعطاف البسيط يجب أن يحقق الشرطين الأساسيين التاليين:

• شرط التوازن Balance Condition:

- محصلة القوى الخارجية تساوي إلى محصلة القوى الداخلية.
- محصلة العزوم الخارجية تساوي إلى محصلة العزوم الداخلية.

• شرط توافق الانفعالات Strain Compatibility Condition:

الانفعالات في الفولاذ والبيتون عند نفس النقطة متساوية وهي متناسبة مع المسافة عن المحور المحايد.

بتطبيق هذين الشرطين على المقطع المبين بالشكل يتم الحصول على ما يلي:

أ. قوى الشد تساوي إلى قوى الضغط:

$$C = T$$

$$0.85f'_c ab = A_s f_y$$

ومنه يمكن عزل المتحول a:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85f'_c b} \quad (1-5)$$

إن نسبة التسليح تساوي إلى:

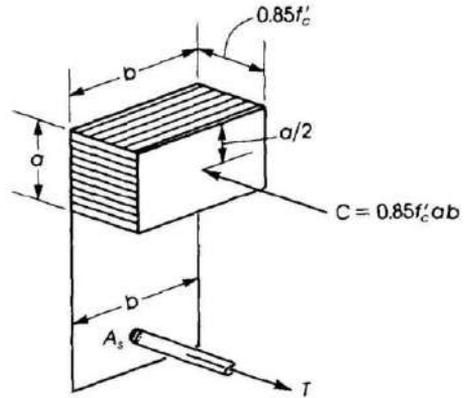
$$\mu_s = \frac{A_s}{bd} \Rightarrow A_s = \mu_s bd$$

d: الارتفاع الفعال وهو المسافة بين محور التسليح السفلي والليف العلوي.

$$a = \frac{\mu_s f_y}{0.85f'_c} d \quad (2-5)$$

ب. العزم الخارجي الإسمي يساوي إلى العزم الداخلي:

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right)$$



الشكل (5-6) قوى الضغط والشد على المقطع

للحصول على العزم التصميمي الخارجي M_u يتم الجداء بمعامل تخفيض المقاومة Ω :

$$M_u = \Omega A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (3-5)$$

بتعويض المعادلة (2-5) في المعادلة (3-5):

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{1}{2} \frac{\mu_s f_y}{0.85 f'_c} d \right)$$

$$M_u = \Omega A_s f_y \left(d - \frac{d}{2} \frac{\mu_s f_y}{0.85 f'_c} \right) = \Omega \mu_s f_y b d^2 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\mu_s f_y}{0.85 f'_c} \right)$$

بالقسمة على $\Omega b d^2$:

$$\frac{M_u}{\Omega b d^2} = \mu_s f_y \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\mu_s f_y}{0.85 f'_c} \right)$$

بقسمة الطرفين على $0.85 f'_c$:

$$\frac{M_u}{\Omega b d^2 0.85 f'_c} = \frac{\mu_s f_y}{0.85 f'_c} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\mu_s f_y}{0.85 f'_c} \right)$$

بفرض:

$$A_0 = \frac{M_u / \Omega}{b d^2 0.85 f'_c} \quad \alpha = \frac{\mu_s f_y}{0.85 f'_c} = \frac{a}{d}$$

تصبح المعادلة:

$$\frac{M_u}{\Omega b d^2 0.85 f'_c} = \frac{\mu_s f_y}{0.85 f'_c} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\mu_s f_y}{0.85 f'_c} \right) \Rightarrow A_0 = \alpha \left(1 - \frac{\alpha}{2} \right) \quad (4-5)$$

وهي معادلة من الدرجة الثانية:

$$\alpha^2 - 2\alpha + 2A_0 = 0$$

وتكون قيمة α بحل المعادلة:

$$\alpha = 1 - \sqrt{1 - 2A_0}$$

• إيجاد مساحة التسليح:

$$\gamma = 1 - \frac{\alpha}{2} \quad \text{بفرض}$$

تصبح المعادلة (3-5):

$$M_u = \Omega A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = \Omega A_s f_y d \left(1 - \frac{\alpha}{2} \right)$$

$$A_s = \frac{M_u / \Omega}{A_s f_y \gamma} \quad (5-5)$$

• إيجاد الارتفاع الفعال اللازم:

$$A_0 = \frac{M_u / \Omega}{b d^2 0.85 f'_c}$$

$$d^2 = \frac{1}{A_0} \frac{M_u / \Omega}{0.85 f'_c b} \Rightarrow d = \frac{1}{\sqrt{A_0}} \sqrt{\frac{M_u / \Omega}{0.85 f'_c b}}$$

$$r = \frac{1}{\sqrt{A_0}} \quad \text{بفرض}$$

$$d = r \sqrt{\frac{M_u / \Omega}{0.85 f'_c b}} \quad (6-5)$$

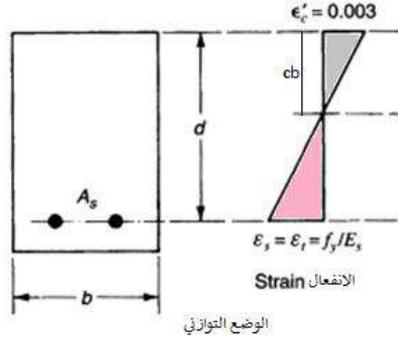
عندما تتجاوز المقاومة الأسطوانية المميزة للبيتون 28MPa يجب تعديل جميع الحسابات.

5-6 مساحة التسليح القصوى في المقاطع أحادية التسليح:

يوصي الكود السوري بآلا تزيد نسبة تسليح الشد الرئيس في المقاطع أحادية التسليح على نصف نسبة التسليح التوازنية التي ينهار عندها الفولاذ والبيتون في نفس اللحظة. وذلك بغية توجيه الانهيار في حال حدوثه إلى الفولاذ، لأنَّ انهياره يعطي مؤشراً قبل مدة كافية. وبالتالي من أجل حساب مساحة التسليح القصوى لابد من دراسة الحالة التوازنية وإيجاد نسبة التسليح ومساحة التسليح التوازنية.

يحدث الانهيار المتوازن Balanced Failure عندما يصل الانفعال في البيتون إلى قيمة انفعال

الانهيار $\epsilon'_c = 0.003$ في نفس اللحظة التي يصل فيها الفولاذ المشدود إلى انفعال الخضوع ϵ'_y .



الشكل (7-5) الانفعال في الوضع التوازني

أ. من تشابه المثلثات يتم إيجاد c_b وهو عبارة عن ارتفاع المحور المحايد التوازني:

$$\frac{\epsilon'_c}{c_b} = \frac{\epsilon_y}{d - c}$$

$$\epsilon'_c(d - c) = c_b \epsilon_y$$

ومنه يكون:

$$\epsilon'_c d - \epsilon'_c c = c_b \epsilon_y \Rightarrow c_b (\epsilon_y + \epsilon'_c) = \epsilon'_c d$$

$$c_b = \frac{\epsilon'_c}{(\epsilon_y + \epsilon'_c)} d = \frac{0.003}{\left(\frac{f_y}{E_s} + 0.003\right)} d$$

بتعويض معامل المرونة الطولاني للفولاذ $E_s = 210,000 \text{ MPa}$

$$c_b = \frac{630}{(630 + f_y)} d \quad (7-5)$$

ب. بالتعويض في المعادلة (2-5) معادلة a:

$$a_b = 0.85 c_b = \frac{\mu_b f_y}{0.85 f'_c} d$$

$$\frac{630}{630 + f_y} d = \frac{\mu_b f_y}{0.72 f'_c} d$$

$$\mu_b = \frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} \quad (8-5)$$

ج. تكون نسبة التسليح العظمى ومساحة التسليح العظمى:

$$\mu_{s \max} = \frac{1}{2} \mu_b = \frac{1}{2} \left[\frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} \right]$$

$$A_{s \max} = \frac{1}{2} A_{sb} = \frac{1}{2} \left[\frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} \right] bd \quad (9-5)$$

د. يمكن إيجاد قيمة α_b, α_{\max} :

$$\alpha_b = \frac{\mu_b f_y}{0.85 f'_c} = \left[\frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} \right] \frac{f_y}{0.85 f'_c}$$

$$\alpha_b = \frac{535.5}{630 + f_y} \quad \alpha_{\max} = \frac{267.75}{630 + f_y} \quad (10-5)$$

يمكن في بعض الحالات الخاصة زيادة مساحة تسليح الشد الرئيس القصوى في المقاطع أحادية التسليح إلى $0.75 A_{sb}$ شرط تحقيق ما يلي:

- حساب السهم.
- عدم إجراء إعادة توزيع عزوم في الجيزان المستمرة.
- وضع كمية تسليح ضغط دنيا بحيث يكون $(A_s - A'_s) \leq \frac{1}{2} A_{sb}$

5-7 تغييرات نسبة التسليح العظمى وموقع المحور المحايد التوازني:

5-7-1 تغييرات نسبة التسليح العظمى:

بغية فهم تغييرات نسبة التسليح العظمى تتم دراسة قيمها من أجل قيم مختلفة للمقاومة المميزة f'_c وإجهاد الخضوع في الفولاذ f_y لأنها المتغيرات الوحيدة في معادلة نسبة التسليح العظمى.

$$f'_c = [15 - 16.5 - 18 - 20 - 25]$$

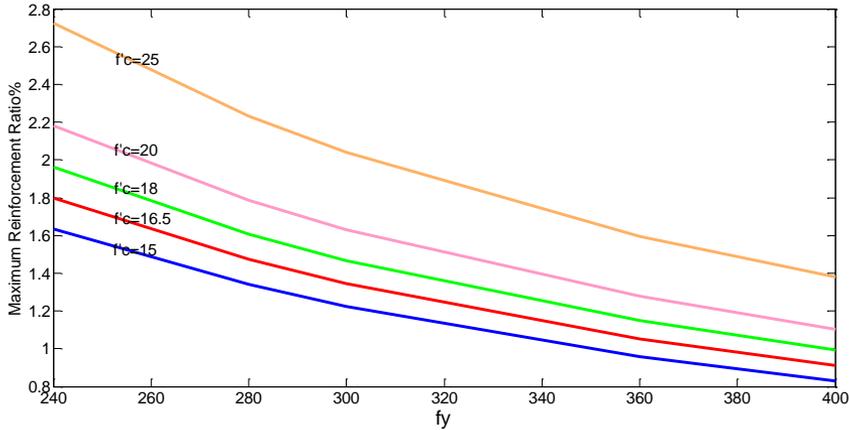
$$f_y = [240 - 280 - 300 - 360 - 400]$$

بالتعويض في معادلة $\mu_{s,max} = \frac{1}{2} \mu_b = \frac{1}{2} \left[\frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} \right]$ يتم ملء الجدول (2-5).

الجدول (2-5) تغيّرات نسبة التسليح العظمى

$f'_c \backslash f_y$	240	280	300	360	400
15	0.0163	0.0134	0.0122	0.0096	0.0083
16.5	0.018	0.0147	0.0135	0.0105	0.0091
18	0.0196	0.0161	0.0147	0.0115	0.0099
20	0.0218	0.0179	0.0163	0.0128	0.011
25	0.0272	0.0223	0.0204	0.016	0.0138

يتم التعبير عن هذه التغيّرات بشكل تخطيطي كما يلي:



الشكل (8-5) تغيّرات نسبة التسليح العظمى مع إجهاد الخضوع والمقاومة المميزة

يُلاحظ أنّ نسبة التسليح العظمى تتراوح بين (0.8% و 2.7%)، كما يُلاحظ أنّها تزداد مع تحسن مواصفات البيتون بينما تنقص بطبيعة الحال مع تحسن نوعية الفولاذ.

2-7-5 تغيّرات موقع المحور المحايد التوازني:

يُعطى موقع المحور المحايد التوازني كنسبة من الارتفاع الفعال كما يلي:

$$\frac{c_b}{d} = \frac{630}{(630 + f_y)} \quad (11-5)$$

بأخذ جميع القيم الممكنة لإجهاد الخضوع يُلاحظ أن المحور المحايد التوازني يأخذ المواقع المبينة بالجدول (3-5):

الجدول (3-5) نسبة موقع المحور المحايد التوازني إلى الارتفاع الفعال

f_y	240	280	300	360	400	420	500
c_b/d	0.72413	0.69230	0.67741	0.63636	0.61165	0.6	0.55752

يُلاحظ من الجدول أن المحور المحايد التوازني يتراوح بين (72%) من الارتفاع الفعال حتى (56%) من الارتفاع الفعال. إنَّ مواقع المحور المحايد في حالة التسليح الأعظمي تكون نصف هذه القيم. أيضاً يمكن دراسة تغيّرات α_{max} مع f_y كما يلي:

$$\alpha_{max} = \frac{a}{d} = \frac{267.75}{(630 + f_y)}$$

الجدول (4-5) نسبة موقع المحور المحايد الأعظمي إلى الارتفاع الفعال

f_y	240	280	300	360	400	420	500
c_{max}/d	0.362	0.346	0.339	0.318	0.306	0.3	0.279
α_{max}	0.308	0.294	0.288	0.270	0.2599	0.255	0.237

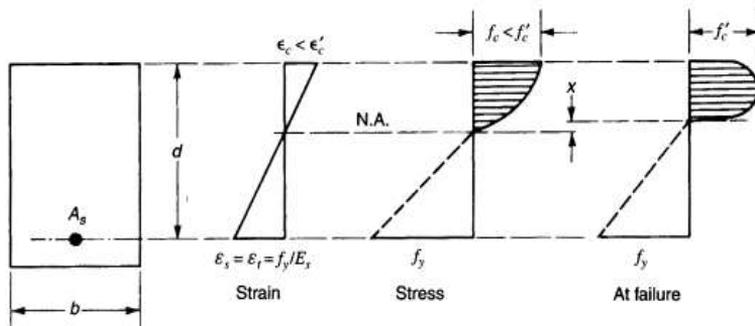
يُلاحظ من الجدول (4-5) أنَّ المحور المحايد الأعظم يتراوح بين (36%) من الارتفاع الفعال حتى 28% من الارتفاع الفعال. بينما تتراوح قيم α_{max} بين 0.308 و 0.237 .

5-8 المقاطع التوازنية والمقاطع فوق وتحت التوازنية:

أ. المقاطع تحت التوازنية Under-reinforced Sections:

تسمّى أيضاً بالمقاطع المحكومة بالشد Tension Controlled Sections بمعنى أن الانهيار بالشد هو الحاكم. يحدث الانهيار في هذا النوع من المقاطع بسيلان الفولاذ قبل انسحاق البيتون، وهي مسلحة بنسبة تسليح أقل من نسبة التسليح التوازنية. إنَّ الانفعال في الفولاذ المشدود يتجاوز انفعال الخضوع أي أن تسليح الشد متلدن. ويكون المحور المحايد أعلى من المحور المحايد التوازني.

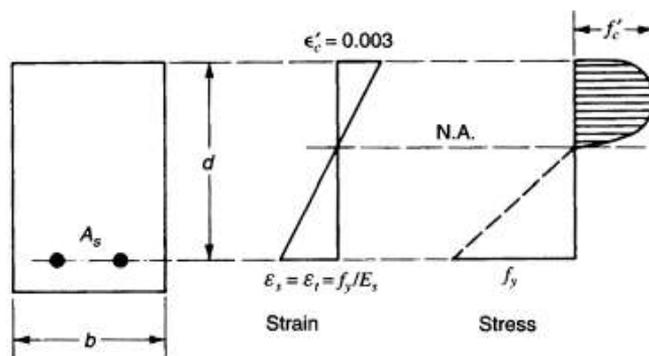
إنَّ هذا النوع هو النوع المفضل الذي يتمُّ التصميم عليه، لأنَّه ينهار بشكل مطواع Ductile Failure حيث يخضع العنصر إلى انتقالات كبيرة وانفعالات كبيرة وبالتالي تشققات كثيرة قبل فترة كافية من الانهيار ممَّا يعطي الفرصة لإعادة تأهيل العنصر وإصلاحه قبل الانهيار الكامل.



الشكل (9-5) المقطع تحت التوازن

ب. المقاطع التوازنية Balanced Sections:

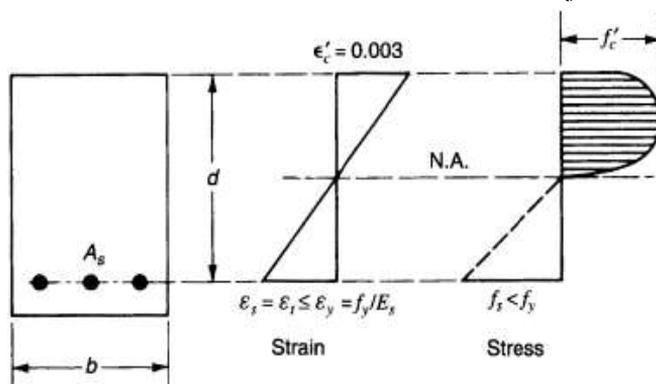
يتمُّ الانهيار في هذه المقاطع بشكل متزامن بين سيلان الفولاذ وانسحاق الببتون حيث تكون هذه المقاطع مسلحة بنسبة تسليح تساوي إلى نسبة التسليح التوازنية. إنَّ الانفعال في الفولاذ المشدود يساوي إلى انفعال الخضوع أي أن تسليح الشد متلدن وإجهاد الفولاذ المشدود يساوي إلى إجهاد الخضوع.



الشكل (10-5) المقطع التوازني

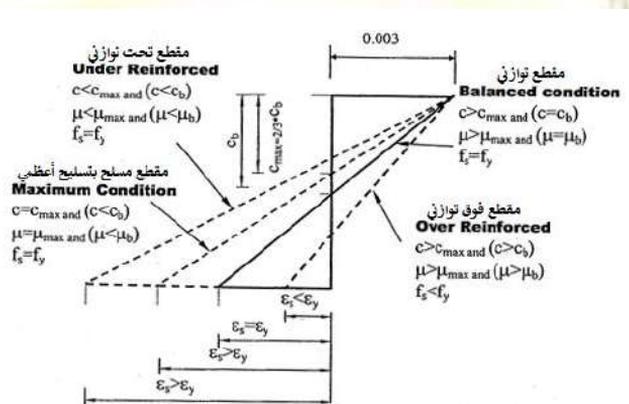
ج. المقاطع فوق التوازنية Over-reinforced Sections:

تسمى أيضاً المقاطع المحكومة بالضغط Compression Controlled Sections أي إن الانهيار بالضغط هو الحاكم. هذه المقاطع مسلحة بنسبة تسليح تتجاوز نسبة التسليح التوازنية وبالتالي يكون الانفعال في فولاذ الشد أقل من انفعال الخضوع أي أنه غير متلدن. يحدث الانهيار بانسحاق البيتون في منطقة الضغط قبل سيلان الفولاذ.



الشكل (11-5) المقطع فوق التوازني

يبين الشكل (12-5) توضيحاً لانفعالات المقاطع الثلاثة.



الشكل (12-5) انفعالات المقاطع الثلاثة

9-5 مساحة التسليح الدنيا Minimum Reinforcement Area:

في بعض الأحيان، ومن أجل اعتبارات معمارية بشكل أساسي يتم اختيار أبعاد العنصر البيتوني لتكون أكبر من الأبعاد اللازمة لتحقيق المقاومة، وبالنتيجة تكون مساحة التسليح صغيرة جداً. بالتالي تكون مقاومة المقطع باستخدام تحليل المقطع المتشقق أقل من مقاومة المقطع غير المتشقق المحسوبة دون

إهمال مقاومة البيتون على الشد. إنَّ انهيار مقاطع كهذه يكون هشاً ويشكل تشققات كبيرة. من أجل التحكم بالتشققات والتأكد من مطاوعة العنصر وتجنب الانهيار المفاجئ بالشد لا بد من تثبيت تسليح طولي في أي مقطع لا يقل عن مساحة التسليح الدنيا الآتية:

$$A_{s\min} = \frac{0.9}{f_y} bd \quad \mu_{s\min} = \frac{0.9}{f_y} \quad (12-5)$$

5-10 العزم المقاوم لمقطع مسلح بتسليح أحادي من أجل نسبة تسليح معينة:

عندما يكون المقطع خاضع إلى انعطاف بسيط Pure Bending معلوم الأبعاد ومسلح بتسليح شد أحادي، يمكن إيجاد أكبر عزم يتحمله هذا المقطع وفق أبعاده وتسليحه من المعادلة (5-13).

$$M_{ur} = \Omega A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (13-5)$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{\mu_s f_y}{0.85 f'_c} d \quad \text{حيث}$$

$$M_{ur} = \Omega b d^2 \mu_s f_y \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\mu_s f_y}{0.85 f'_c} \right) \quad \text{ويمكن أن يُصاغ بشكل آخر:}$$

$$M_{ur} = \Omega b d^2 \mu_s f_y \frac{0.85 f'_c}{0.85 f'_c} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\mu_s f_y}{0.85 f'_c} \right)$$

$$\alpha = \frac{\mu_s f_y}{0.85 f'_c} = \frac{a}{d} \quad \text{وبما أن}$$

$$M_{ur} = \Omega b d^2 0.85 f'_c \alpha \left(1 - \frac{\alpha}{2} \right) = \Omega b d^2 0.85 f'_c \frac{a}{d} \left(1 - \frac{a}{2d} \right) \quad (14-5)$$

إنَّ العزم الأعظم الذي يتحمله المقطع يكون من أجل نسبة تسليح عظمى $\mu_{s\max}$.

5-11 العوامل المؤثرة على المقاومة الحدية Factors Affecting Ultimate Strength:

يمكن استخلاص العوامل المؤثرة على المقاومة الحدية (العزم الحدي الذي يستطيع المقطع تحمله) من المعادلة (5-15).

$$M_{ur} = \Omega b d^2 \mu_s f_y \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\mu_s f_y}{0.85 f'_c} \right) \quad (15-5)$$

هذه العوامل كما هو ملاحظ هي التالية:

1. إجهاد الخضوع في فولاذ التسليح f_y .
2. مقاومة البيتون على الضغط بدلالة المقاومة الأسطوانية المميزة f'_c .
3. الارتفاع الفعال للجائز d .
4. عرض الجائز b .
5. نسبة التسليح μ_s .

5-11-1 دراسة تأثير إجهاد الخضوع f_y على المقاومة الحديدية:

يتم تثبيت المتحولات الأخرى وإيجاد تغيرات إجهاد الخضوع مع المقاومة الحديدية:

$$\mu_s = 0.075 \quad f'_c = 20 \text{MPa} \quad f_y (\text{MPa}) = [240 - 280 - 300 - 360 - 400]$$

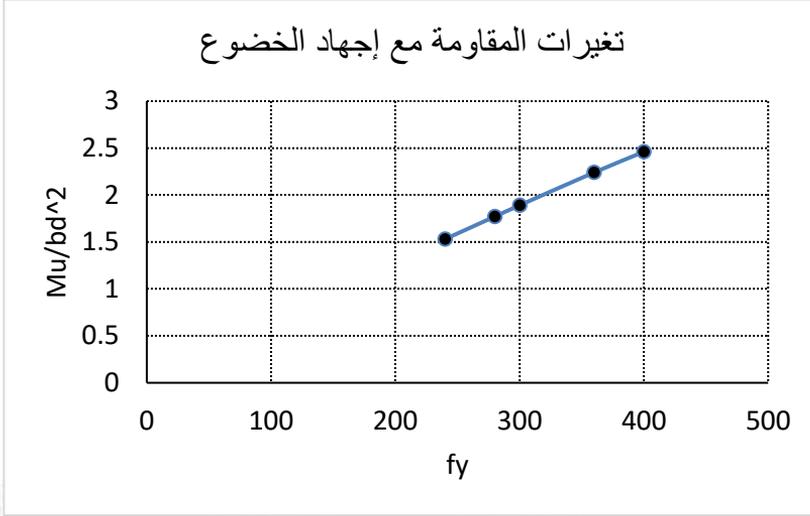
$$\frac{M_{ur}}{b d^2} \left(\frac{N}{\text{mm}^3} \right) = \Omega \mu_s f_y \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\mu_s f_y}{0.85 f'_c} \right)$$

بدراسة تغيرات $\frac{M_{ur}}{b d^2}$ مع f_y يُلاحظ أن $\frac{M_{ur}}{b d^2}$ تأخذ القيم التالية:

$$\frac{M_{ur}}{b d^2} = [1.53 - 1.77 - 1.89 - 2.24 - 2.46]$$

من الواضح أن لإجهاد الخضوع تأثيراً كبيراً على المقاومة الحديدية. إنَّ زيادة إجهاد الخضوع بنسبة 40%

من 240MPa إلى 400MPa أدت إلى زيادة المقاومة الحديدية بالنسبة $\frac{2.46 - 1.53}{2.46} \times 100 = 38\%$



الشكل (5-13) تغيرات المقاومة الحديّة مع إجهاد الخضوع

5-11-2 دراسة تأثير المقاومة المميزة f'_c على المقاومة الحديّة:

إنّ تأثير المقاومة المميزة للبيتون على الضغط على المقاومة الحديّة بالنسبة لتأثير إجهاد الخضوع ضعيف جداً. يتمّ تثبيت المتحولات الأخرى وإيجاد تغيرات المقاومة المميزة مع المقاومة الحديّة:

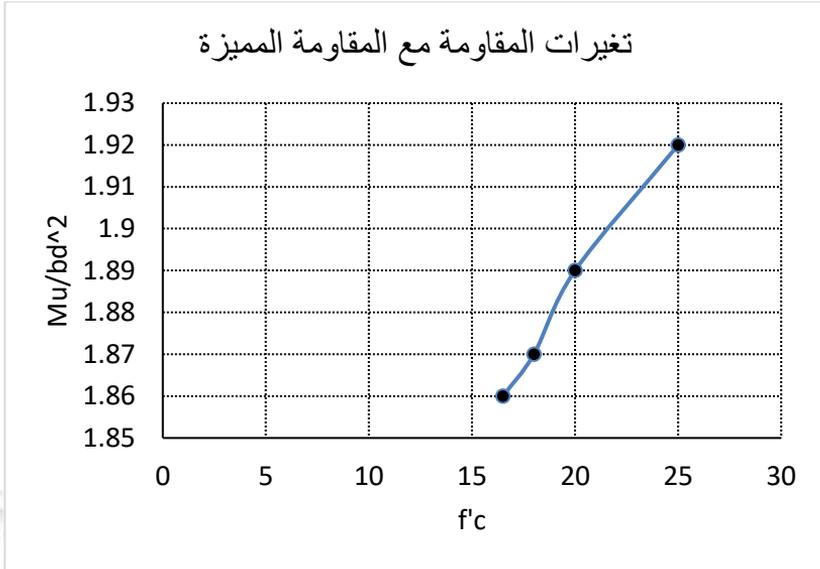
$$\mu_s = 0.075 \quad f_y = 300MPa \quad f'_c(MPa)_c = [16.5 - 18 - 20 - 25]$$

بدراسة تغيرات $\frac{M_{ur}}{bd^2}$ مع f'_c يُلاحظ أن $\frac{M_{ur}}{bd^2}$ تأخذ القيم التالية:

$$\frac{M_{ur}}{bd^2} = [1.86 - 1.87 - 1.89 - 1.92]$$

يُلاحظ أنّ زيادة المقاومة المميزة بنسبة (34%) من 16.5MPa إلى 25MPa أدت إلى زيادة المقاومة

$$\text{الحديّة بالنسبة } \frac{1.92 - 1.86}{1.92} \times 100 = 3\%$$



الشكل (5-14) تغيّرات المقاومة الحديّة مع المقاومة المميزة

5-11-3 دراسة تأثير عرض الجائز b على المقاومة الحديّة:

يتمّ تثبيت المتحولات الأخرى وإيجاد تغيّرات العرض مع المقاومة الحديّة:

$$\mu_s = 0.075 \quad f_y = 300MPa \quad f'_c = 20Mpa \quad b(mm) = [150 - 250 - 350 - 450]$$

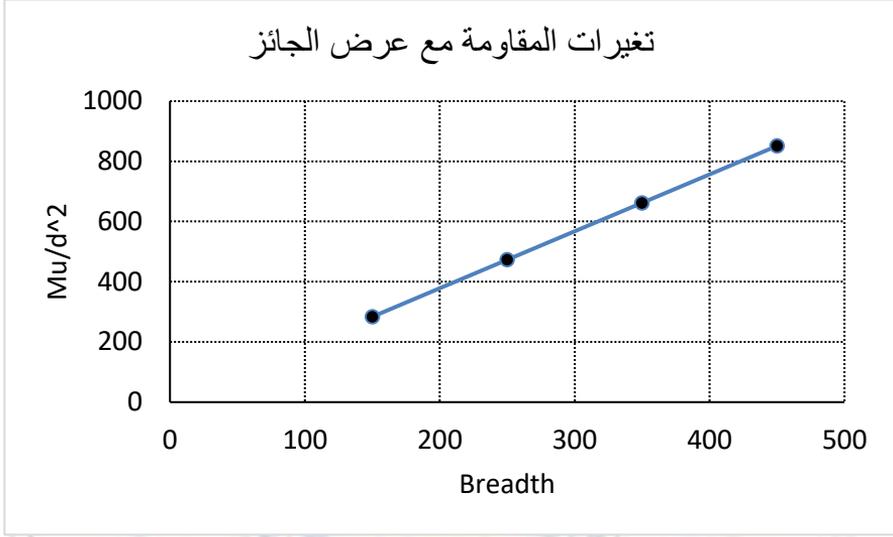
$$\frac{M_{ur}}{d^2} \left(\frac{N}{mm^2} \right) = \Omega \mu_s f_y b \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\mu_s f_y}{0.85 f'_c} \right)$$

بدراسة تغيّرات $\frac{M_{ur}}{d^2}$ مع f'_c يُلاحظ أنها تأخذ القيم التالية:

$$\frac{M_{ur}}{d^2} = [283.6 - 473 - 662 - 851]$$

يُلاحظ أنّ زيادة العرض بنسبة (66%) من 150mm إلى 450mm أدت إلى زيادة المقاومة الحديّة حوالي

.66%



الشكل (5-15) تغيرات المقاومة مع عرض الجائز

4-11-5 دراسة تأثير الارتفاع الفعال d على المقاومة الحديدية:

إنَّ زيادة الارتفاع الفعال له التأثير الأكبر على المقاومة الحديدية للعنصر. يتم تثبيت المتحولات الأخرى وإيجاد تغيرات الارتفاع الفعال مع المقاومة الحديدية:

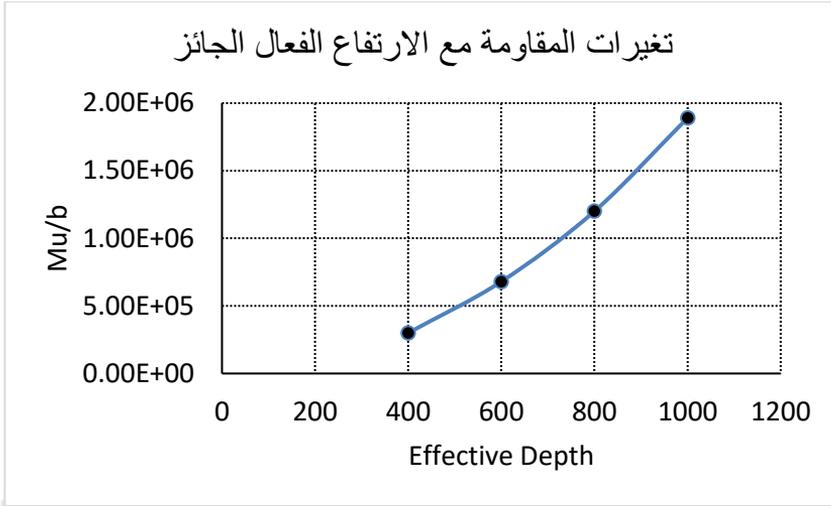
$$\mu_s = 0.075 \quad f_y = 300MPa \quad f'_c = 20Mpa \quad d(mm) = [400 - 600 - 800 - 1000]$$

$$\frac{M_{ur}}{b} \left(\frac{N}{mm} \right) = \Omega \mu_s f_y d^2 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\mu_s f_y}{0.85 f'_c} \right)$$

بدراسة تغيرات $\frac{M_{ur}}{b}$ مع f'_c يُلاحظ أنَّها تأخذ القيم الآتية:

$$\frac{M_{ur}}{b} = [0.3 \times 10^6 - 0.68 \times 10^6 - 1.2 \times 10^6 - 1.89 \times 10^6]$$

يُلاحظ أنَّ زيادة الارتفاع الفعال بنسبة (60%) من 400mm إلى 1000mm أدت إلى زيادة المقاومة الحديدية حوالي 84%.



الشكل (5-16) تغيّرات المقاومة مع الارتفاع الفعال للجائز

5-11-5 دراسة تأثير نسبة التسليح μ_s على المقاومة الحديّة:

إنّ زيادة نسبة التسليح لها تأثير ملحوظ على المقاومة الحدية للعنصر. يتمّ تثبيت المتحولات الأخرى وإيجاد تغيّرات نسبة التسليح مع المقاومة الحديّة:

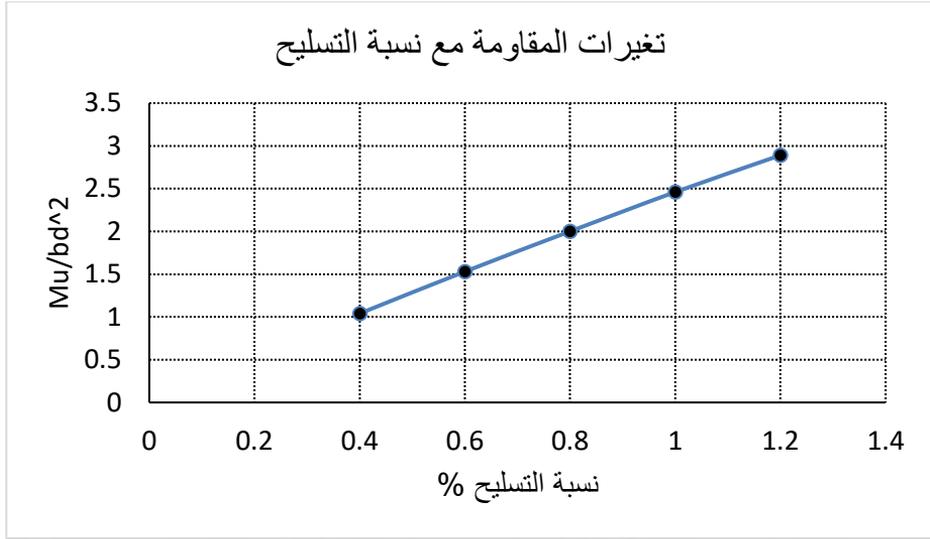
$$f_y = 300MPa \quad f'_c = 20MPa \quad \mu_s \% = [0.4 - 0.6 - 0.8 - 1 - 1.2]$$

$$\frac{M_{ur}}{bd^2} \left(\frac{N}{mm^3} \right) = \Omega \mu_s f_y \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\mu_s f_y}{0.85 f'_c} \right)$$

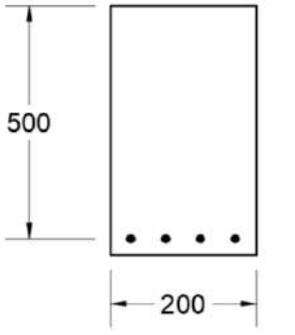
بدراسة تغيّرات $\frac{M_{ur}}{bd^2}$ مع μ_s يُلاحظ أن $\frac{M_{ur}}{bd^2}$ تأخذ القيم التالية:

$$\frac{M_{ur}}{bd^2} = [1.04 - 1.53 - 2 - 2.46 - 2.89]$$

يُلاحظ أنّ زيادة نسبة التسليح بنسبة 66% من 0.4% إلى 1.2% أدت إلى زيادة المقاومة الحديّة حوالي 64%.



الشكل (17-5) تغيرات المقاومة مع نسبة التسليح



12-5 أمثلة على تحليل المقاطع أحادية التسليح وحساب العزم

المقاوم:

مثال تطبيقي (1-5):

حدّد موقع المقطع المبين بالشكل بالنسبة إلى الحالة

التوازنية، وذلك من أجل مساحات التسليح التالية:

$$A_s (mm^2) = [685 - 1620 - 2050 - 3300]$$

علماً بأن مواصفات المواد هي $f'_c = 20MPa$ $f_y = 300MPa$ والأبعاد مقدّرة بالمتر.

الحل:

1- حساب نسبة التسليح التوازنية والعظمى والدنيا:

$$\mu_b = \frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} = \frac{455}{630 + 300} \frac{20}{300} = 0.0326 = 3.26\%$$

$$\mu_{max} = 0.0163 = 1.63\%$$

$$\mu_{min} = \frac{0.9}{f_y} = 0.003 = 0.3\%$$

2- حساب نسب التسليح من أجل الحالات الأربع ومقارنتها مع الحالة التوازنية:

$$\mu_s(1) = \frac{A_s}{bd} = \frac{685}{200 \times 500} = 0.00685 = 0.69\%$$

إن نسبة التسليح في الحالة الأولى أقل من نسبة التسليح التوازنية، وهذا يعني أن المقطع تحت توازني- وهي أقل من نسبة التسليح العظمى وأكبر من نسبة التسليح الدنيا فالمقطع مقبول التسليح والأبعاد.

$$\mu_s(2) = \frac{A_s}{bd} = \frac{1620}{200 \times 500} = 0.0162 = 1.62\%$$

إن نسبة التسليح في الحالة الثانية أقل من نسبة التسليح التوازنية، وهذا يعني أن المقطع تحت توازني- وهي أقل من نسبة التسليح العظمى وأكبر من نسبة التسليح الدنيا فالمقطع مقبول التسليح والأبعاد.

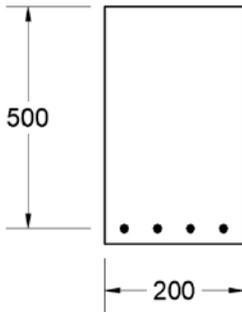
$$\mu_s(3) = \frac{A_s}{bd} = \frac{2050}{200 \times 500} = 0.0205 = 2.05\%$$

إن نسبة التسليح في الحالة الثالثة أقل من نسبة التسليح التوازنية، وهذا يعني أن المقطع تحت توازني- ولكنها أكبر من نسبة التسليح العظمى فالمقطع غير مقبول التسليح والأبعاد.

$$\mu_s(4) = \frac{A_s}{bd} = \frac{3300}{200 \times 500} = 0.033 = 3.3\%$$

إن نسبة التسليح في الحالة الرابعة أكبر من نسبة التسليح التوازنية، وهذا يعني أن المقطع فوق توازني فالمقطع مرفوض جملة وتفصيلاً.

مثال تطبيقي (2-5):



تأكد من أن المقطع المبين بالشكل يستطيع تحمّل

عزم حدي قدره $M_u = 115 \text{ kN.m}$.

علماً بأن مواصفات المواد هي:

$f'_c = 20 \text{ MPa}$ $f_y = 360 \text{ MPa}$ والأبعاد مقدّرة $A_s = 1115 \text{ mm}^2$

بالملمتر.

الحل:

1- تُعطى معادلة العزم الحدي كما يلي:

$$M_{ur} = \Omega A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{\mu_s f_y}{0.85 f'_c} d$$

حيث

بالتعويض

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{1115 \times 360}{0.85 \times 20 \times 200} = 118.06 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} M_{ur} &= \Omega A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 0.9 \times 1115 \times 360 (500 - 118.06/2) \\ &= 159.3 \times 10^6 \text{ N.mm} = 159.3 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

إنَّ العزم الذي يتحمله المقطع أكبر من العزم الحدي المُعطى وبالتالي فهو بالتأكيد يستطيع تحمله.

2- التحقق من كون التسليح مقبول:

$$\begin{aligned} A_{s,\max} &= \frac{1}{2} \left[\frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} \right] b d \\ &= \frac{1}{2} \left[\frac{455}{630 + 360} \frac{20}{360} \right] 200 \times 500 = 1277 \text{ mm}^2 > A_s \end{aligned}$$

والمقطع تحت توازني ومقبول.

مثال تطبيقي (3-5):

أوجد ما يلي من أجل المقطع المبين بالشكل:

1- مخطط الانفعال ومخطط الإجهاد من أجل مساحة تسليح قدرها $A_s=985\text{mm}^2$.

2- عزم الانعطاف الحدي الذي يتحمله المقطع.

3- مساحة التسليح العظمى التي يُمكن أن يسَّحَّ بها المقطع.

4- عزم الانعطاف الأعظم الذي يتحمله المقطع من أجل التسليح بنسبة تسليح عظمى.

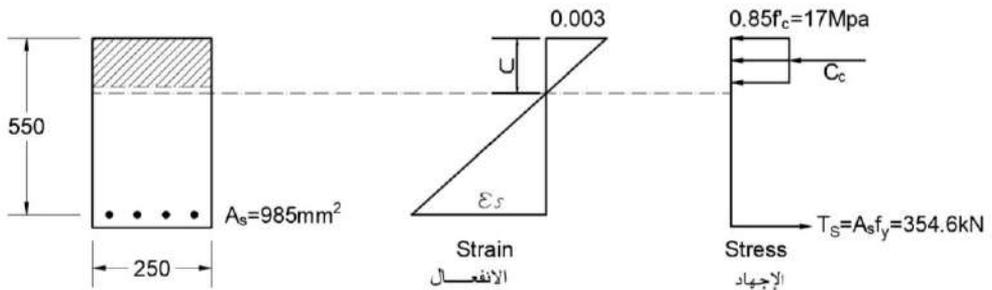
، الأبعاد مقدّرة بالملمتر. $f_y = 360\text{MPa}$ $f'_c = 20\text{MPa}$

الحل:

1- من أجل رسم مخطط الإجهاد ومخطط الانفعال لابد من تحديد موقع المحور المحايد:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{985 \times 360}{0.85 \times 20 \times 250} = 83.44\text{mm}$$

$$c = a / 0.85 = 98.16\text{mm}$$



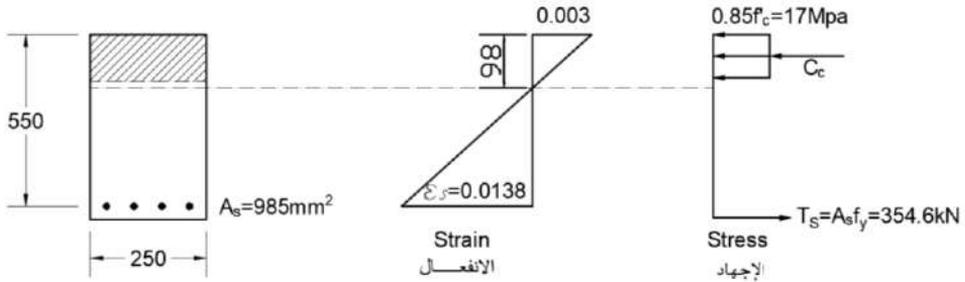
يتم إيجاد انفعال الفولاذ المشدود من تشابه المثلثات:

$$\frac{\epsilon'_c}{c} = \frac{\epsilon_s}{d-c} \Rightarrow \epsilon_s = 0.003 \frac{d-c}{c}$$

$$\varepsilon_s = 0.003 \frac{d-c}{c} = 0.003 \frac{550-98.16}{98.16} = 0.0138$$

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{360}{210000} = 0.0017$$

يُلاحظ أن $\varepsilon_s > \varepsilon_y$ وهذا يعني أن فولاذ الشد متلدن والمقطع تحت توازني.



يتم التأكد بتحديد موقع المحور المحايد التوازني:

$$c_b = \frac{630}{(630 + f_y)} d = \frac{630}{(630 + 360)} 550 = 350 \text{ mm} > c = 98.16 \text{ mm}$$

2- حساب العزم الحدّي الذي يتحمّله المقطع وفق التسليح المفروض:

$$M_{ur} = \Omega A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 0.9 \times 985 \times 360 \left(550 - \frac{83.44}{2} \right)$$

$$= 162.2 \times 10^6 \text{ N.mm} = 162.2 \text{ kN.m}$$

3- مساحة التسليح العظمى:

$$A_{s \max} = \frac{1}{2} \left[\frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} \right] b d$$

$$= \frac{1}{2} \left[\frac{455}{630 + 360} \frac{20}{360} \right] 250 \times 550 = 2065.97 \text{ mm}^2 > A_s$$

4- عزم الانعطاف الذي يقابل نسبة تسليح عظمى:

$$M_{\max} = \Omega A_{s \max} f_y \left(d - \frac{a_{\max}}{2} \right)$$

$$a_{\max} = \frac{1}{2} a_b = \frac{1}{2} 0.85 \times 350 = 148.75 \text{ mm}$$

$$M_{\max} = \Omega A_s f_y \left(d - \frac{a_{\max}}{2} \right)$$

$$= 0.9 \times 2065.97 \times 360 (550 - 148.75 / 2) = 318.3 \times 10^6 \text{ N.mm} = 318.3 \text{ kN.m}$$

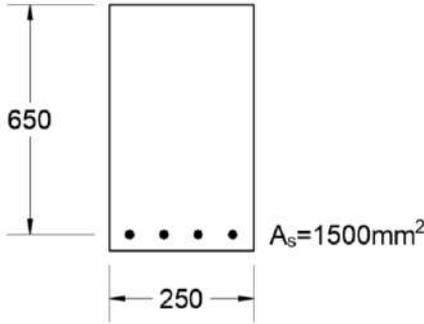
وهو أقصى عزم يمكن أن يتحمله المقطع البيتوني.

مثال تطبيقي (4-5):

أوجد العزم الحدي الذي يتحمله المقطع المبين بالشكل، ثم تأكد من كون فولاذ الشد متلدن واحسب مساحة التسليح القصوى.

علماً بأن مواصفات المواد هي: $f'_c = 32 \text{ MPa}$ $f_y = 400 \text{ MPa}$ والأبعاد مقدّرة بالملمتر.

الحل:



1- تُعطى معادلة العزم الحدي كما يلي:

$$M_u = \Omega A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{1500 \times 400}{0.85 \times 32 \times 250} = 88.24 \text{ mm}$$

بالتعويض

$$M_{ur} = \Omega A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 0.9 \times 1500 \times 400 (650 - 88.24 / 2)$$

$$= 327.2 \times 10^6 \text{ N.mm} = 327.2 \text{ kN.m}$$

2- إيجاد انفعال الفولاذ المشدود:

$$\varepsilon_s = 0.003 \frac{d - c}{c}$$

بما أنَّ المقاومة المميزة للبيتون تتجاوز 28MPa ووجب حساب النسبة β_1 : $a = \beta_1 c$

$$\beta_1 = 0.85 - \frac{0.05(f'_c - 28)}{7} = 0.821$$

$$a = \beta_1 c \Rightarrow c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{88.24}{0.821} = 107.4 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s = 0.003 \frac{d - c}{c} = 0.003 \frac{650 - 107.4}{107.4}$$

$$= 0.0152 > \varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{400}{210000} = 0.0019$$

أي إنَّ فولاذ التسليح الشد متلدن والمقطع تحت توازني.

3- مساحة التسليح القصوى:

$$c_b = \frac{630}{(630 + f_y)} d$$

بالتعويض في معادلة a:

$$a_b = \beta_1 c_b = \frac{\mu_b f_y}{0.85 f'_c} d$$

$$\frac{630}{630 + f_y} d = \frac{\mu_b f_y}{\beta_1 0.85 f'_c} d$$

$$\mu_b = \beta_1 \frac{535.5}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} = 0.821 \frac{535.5}{630 + 400} \frac{32}{400} = 0.0402$$

$$A_{s,b} = 0.0402 \times 250 \times 650 = 6532 \text{ mm}^2$$

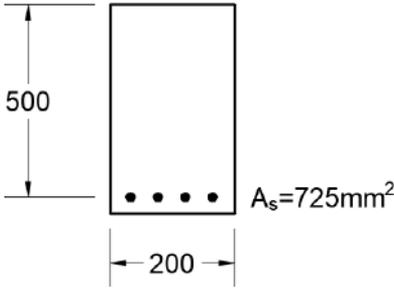
$$A_{s,\max} = \frac{1}{2} 6532 = 3266 \text{ mm}^2$$

وهي أكبر من مساحة التسليح الموجودة والمقطع مقبول.

$$A_{s,\min} = \frac{0.9}{f_y} b d = 365.63 \text{ mm}^2$$

مثال تطبيقي (5-5):

ارسم مخطط الانفعال ومخطط الإجهاد من أجل المقطع المبين بالشكل من أجل تسليح قدره $A_s=725\text{mm}^2$ ، ثم من أجل الحالة التوازنية. تحقق من كون المقطع قادر على تحمل عزم قدره $M_u=100\text{kN.m}$.



مع العلم أن $f_y = 300\text{MPa}$ $f'_c = 25\text{MPa}$

والأبعاد مقدرة بالملمتر.

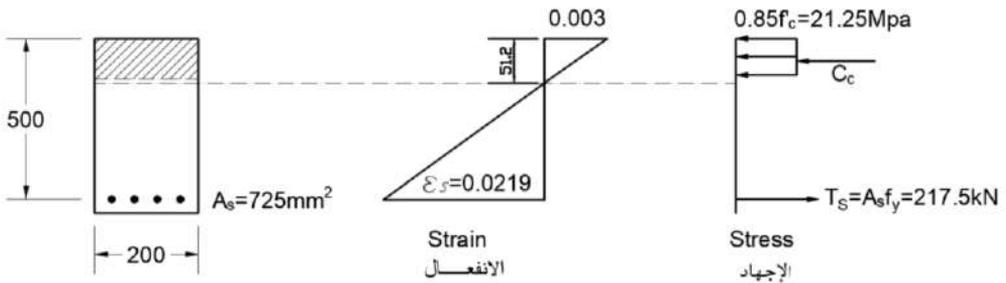
الحل:

1- من أجل رسم مخططات الانفعال والإجهاد يتّم حساب مواقع المحاور المحايد a, ab, c, cb ثم إيجاد انفعال الفولاذ المشدود.

• من أجل التسليح المفروض:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{725 \times 300}{0.85 \times 25 \times 200} = 51.18\text{mm}$$

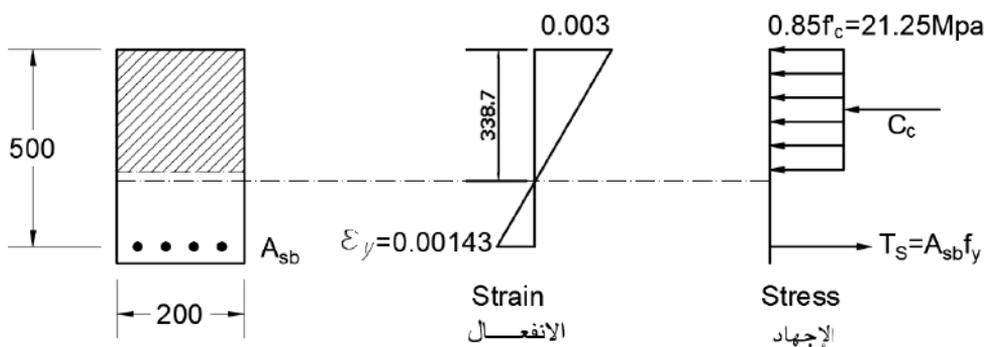
$$\varepsilon_s = 0.003 \frac{d-c}{c} = 0.003 \frac{500-60.2}{60.2} = 0.0219 > \varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{300}{210000} = 0.00143$$



• من أجل حالة التسليح التوازني:

$$c_b = \frac{630}{(630 + f_y)} d = \frac{630}{(630 + 300)} 500 = 338.7\text{mm} > c = 60.2\text{mm}$$

$$\varepsilon_s = 0.003 \frac{d-c_b}{c_b} = 0.003 \frac{500-338.7}{338.7} = 0.00143 = \varepsilon_y$$



2- العزم الذي يتحمله المقطع من أجل التسليح المفروض:

$$M_{ur} = \Omega A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 0.9 \times 725 \times 300 \left(500 - 51.18 / 2 \right)$$

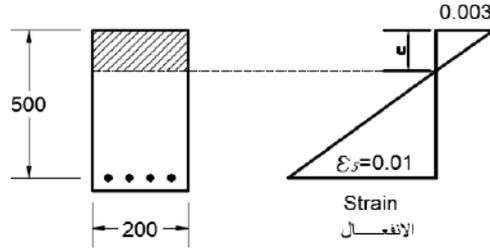
$$= 92.86 \times 10^6 \text{ N.mm} = 92.86 \text{ kN.m}$$

إن العزم الذي يتحمله المقطع أقل من 100kN.m وبالتالي المقطع غير قادر على حمل هذا العزم وفق التسليح المفروض ويجب زيادة التسليح أو زيادة أبعاد المقطع.

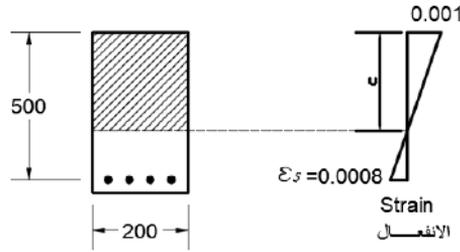
مثال تطبيقي (5-6):

جائر من البيتون المسلح ذي مقطع مستطيل $b=200\text{mm}$, $d=500\text{mm}$ والمطلوب:

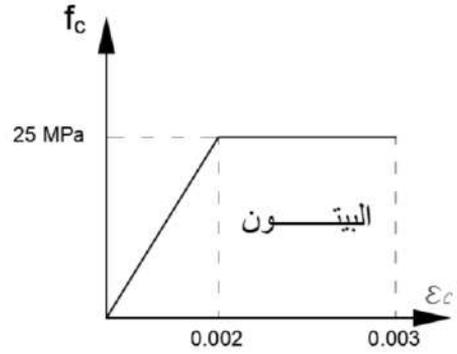
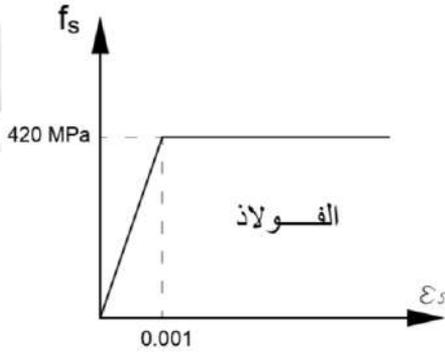
- 1- أوجد مخطط الإجهاد على المقطع العرضي من أجل الانفعالات في البيتون والفولاذ في الحالة A، ثم في الحالة B. وذلك بالاعتماد على مخطط إجهاد-انفعال المبسط المبين بالشكل لكل من البيتون والفولاذ، ودون أخذ عامل تخفيض المقاومة بالحسبان.
- 2- احسب العزم الذي يتحمله المقطع ومساحة التسليح.



الحالة A



الحالة B



الحل:

1- الحالة A:

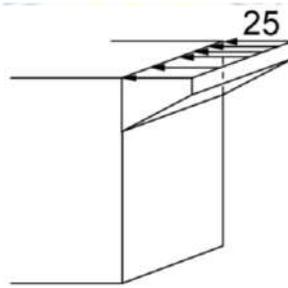
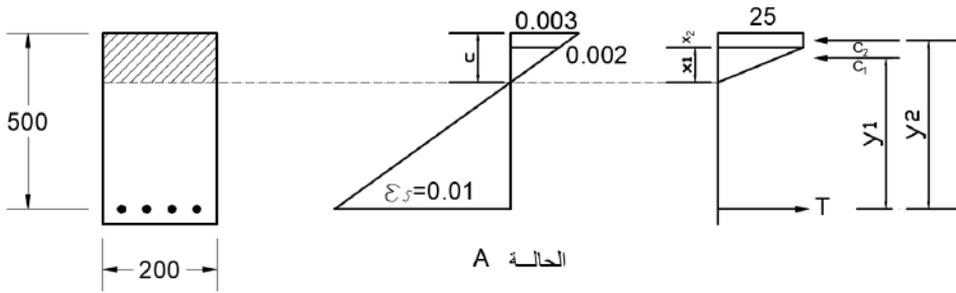
من التشابه في مخطط الانفعال يتم إيجاد موقع المحور المحايد c:

$$\frac{0.003}{c} = \frac{0.01}{d - c} \Rightarrow c = \frac{0.003}{0.003 + 0.01} d = 115.38 \text{ mm}$$

الإجهاد في الفولاذ: بما أن الانفعال في الفولاذ $\epsilon_s = 0.01 > \epsilon_y = 0.001$ من مخطط إجهاد-انفعال

$$f_s = 420 \text{ MPa}$$

الإجهاد في البيتون: واضح أنّ الليف العلوي وصل إلى انفعال التلدن، ولكن يجب معرفة كون كامل المقطع المضغوط متلدن أو لا. إنّ توزع الإجهاد على المقطع يشابه مخطط إجهاد-انفعال، نوجد من التشابه المسافة x_1 التي يبدأ عندها السلوك اللامرن. فإذا كانت قيمة x_1 سالبة يكون المقطع المضغوط بكامله متلدن. أمّا إذا كانت لها قيمة أقل من c يكون المقطع المضغوط متلدناً جزئياً.



من التشابه:

$$\frac{0.003}{c} = \frac{0.002}{x_1} \Rightarrow x_1 = \frac{0.002}{0.003} c = 76.92 \text{ mm}$$

$$x_2 = c - x_1 = 115.38 - 76.92 = 38.46 \text{ mm}$$

يمكن تجزئة قوة الضغط C إلى جزأين:

$$C = C_1 + C_2$$

$$C_1 = \frac{f_c x_1}{2} b = \frac{25 \times 76.92}{2} 200 = 192.3 \text{ kN}$$

$$C_2 = f_c x_2 b = 25 \times 38.46 \times 200 = 192.3 \text{ kN}$$

$$C = 192.3 \times 2 = 384.6 \text{ kN}$$

$$T = A_s f_s = 420 A_s$$

من معادلة التوازن:

$$C = T \Rightarrow 384.6 = 420A_s \times 10^{-3} \Rightarrow A_s = 915.7 \text{ mm}^2$$

بحساب ذراعي قوتي الضغط C_1, C_2 :

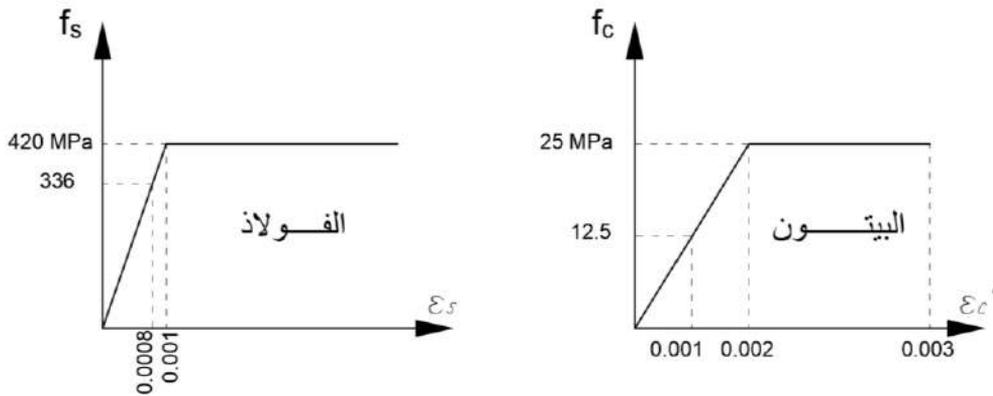
$$y_1 = d - x_2 - x_1 / 3 = 500 - 38.46 - 76.92 / 3 = 435.9 \text{ mm}$$

$$y_2 = d - x_2 / 2 = 500 - 38.46 / 2 = 480.77 \text{ mm}$$

بأخذ العزم حول محور مار من التسليح:

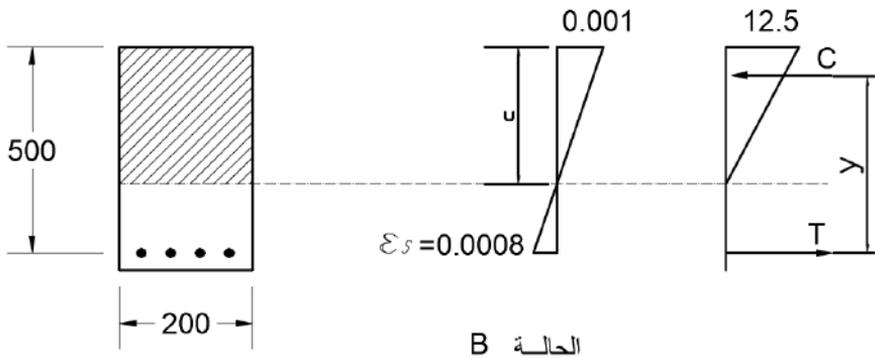
$$M_n = C_1 y_1 + C_2 y_2 = [192.3 \times 435.9 + 192.3 \times 480.77] 10^{-6} = 176.28 \text{ kN.m}$$

-2 الحالة B:



يُلاحظ أنّ كلاً من إجهادات البيتون والفولاذ هي ضمن المرحلة المرنة. من تشابه المثلثات في مخطط 'جهد انفعال يتم إيجاد قيم الإجهادات:

$$f_s = \frac{0.0008}{0.001} 420 = 336 \text{ MPa} \quad f_c = \frac{25}{2} = 12.5 \text{ MPa}$$



يتم إيجاد موقع المحور المحايد C من تشابه المثلثات في مخطط الانفعال على المقطع:

$$c = \frac{0.001}{0.001 + 0.0008} d = 0.5556 \times 500 = 277.8 \text{ mm}$$

إيجاد قوة الضغط في البيتون وقوة الشد في الفولاذ:

$$C = \frac{f_c \times c}{2} b = \frac{12.5 \times 277.8}{2} 200 = 347.25 \text{ kN}$$

$$T = A_s f_s = 336 A_s$$

من معادلة التوازن:

$$C = T \Rightarrow 347.25 = 336 A_s \times 10^{-3} \Rightarrow A_s = 1033.48 \text{ mm}^2$$

بحساب ذراعي قوة الضغط C:

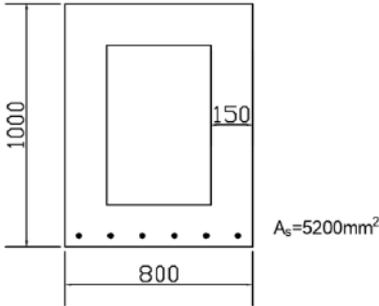
$$y = d - c/3 = 500 - 277.8/3 = 407.4 \text{ mm}$$

العزم حول محور مار من التسليح السفلي:

$$M_n = Cy = [347.25 \times 407.4] 10^{-3} = 141.5 \text{ kN.m}$$

مثال تطبيقي (7-5):

جائز من البيتون المسلح مقطعه مبين بالشكل بأبعاد ملمترية، والمطلوب:



1- أوجد موقع المحور المحايد.

2- تحقق من كون الفولاذ المشدود متلدن.

3- احسب العزم الذي يتحمله المقطع.

$$f_y = 420 \text{ MPa} \quad f'_c = 20 \text{ MPa} \quad d' = 80 \text{ mm}$$

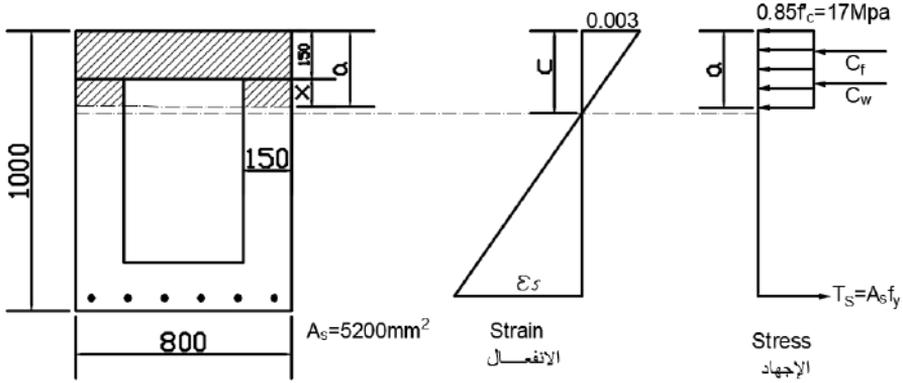
الحل:

1- موقع المحور المحايد c:

بفرض أن المسافة a تساوي سماكة الجناح 200 مضافاً لها المجهول x:

تكون قوة الشد في الفولاذ بفرض أن الفولاذ متلدن:

$$T = A_s f_y = 5200 \times 420 = 2184000 \text{ N}$$



قوة الضغط في الببتون تساوي إلى جءاء الإجهاد $0.85f_c$ بالمساحة التي يغطيها وارتفاعها
:a=0.85c

$$C = 17A_c$$

$$A_c = b_f \cdot t + 2x \cdot t = 800 \times 150 + 300x = 120000 + 300x$$

$$C = (120000 + 300x)17 = 2.04 \times 10^6 + 5100x$$

بتطبيق شرط التوازن:

$$C = T \Rightarrow 2.04 \times 10^6 + 5100x = 2184000 \Rightarrow x = 28.24 \text{ mm}$$

وتكون سماكة بلوك الإجهاد a:

$$a = x + 150 = 178.24 \text{ mm}$$

موقع المحور المحايد:

$$c = a / 0.85 = 209.7 \text{ mm}$$

2- التأكد من أن فولاذ الشد متلدن: $d = H - d' = 1000 - 80 = 920 \text{ mm}$

$$\epsilon_s = 0.003 \frac{d - c}{c} = 0.003 \frac{920 - 209.7}{209.7}$$

$$= 0.0102 > \epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{420}{210000} = 0.002$$

3- حساب العزم الذي يتحمله المقطع:

بغية تسهيل حساب الذراع يتم تجزئة قوة الضغط في الببتون إلى قوتين، إحداها في الجناح

العلوي و الثانية في الجذعين:

$$C_f = 2.04 \times 10^6 N \quad y_f = d - t / 2 = 920 - 75 = 845 \text{ mm}$$

$$C_w = 2t \cdot x (0.85 f'_c) = 144024 N$$

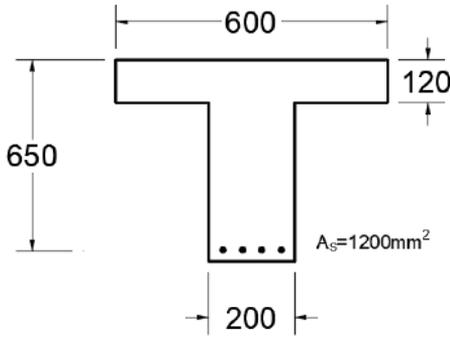
$$y_w = d - t - x / 2 = 920 - 150 - 28.24 / 2 = 755.88 \text{ mm}$$

العزم حول محور مار من التسليح السفلي:

$$M_{ur} = \Omega [C_f y_f + C_w y_w]$$

$$= 0.9 [2.04 \times 10^6 \times 845 + 144024 \times 755.88] 10^{-6} = 1649.4 \text{ kN.m}$$

مثال تطبيقي (8-5):



جائر من البيتون المسلح مقطعه بشكل T مبين

بالشكل بأبعاد ملمترية، مواصفات المواد هي

$$f_y = 360 \text{ MPa} \quad f'_c = 20 \text{ MPa}$$

1- أوجد موقع المحور المحايد بالنسبة

للمحور المحايد التوازني.

2- تحقق من كون الفولاذ المشدود متلدن.

3- احسب العزم الذي يتحمله المقطع بالنسبة

للتسليح المفروض.

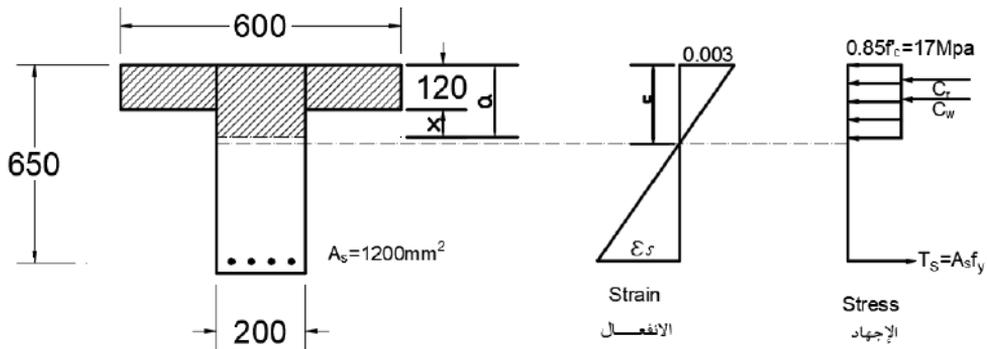
الحل:

1- موقع المحور المحايد C:

بفرض أن المسافة a تساوي سماكة الجناح 120 مضافاً لها المجهول x:

تكون قوة الشد في الفولاذ بفرض أن الفولاذ متلدن:

$$T = A_s f_y = 1200 \times 360 = 432000 N$$



إنَّ قوة الضغط في البيتون تساوي إلى جداء الإجهاد $0.85f_c$ بالمساحة التي يغطيها وارتفاعها

$$:a=0.85c$$

$$C = 17A_c$$

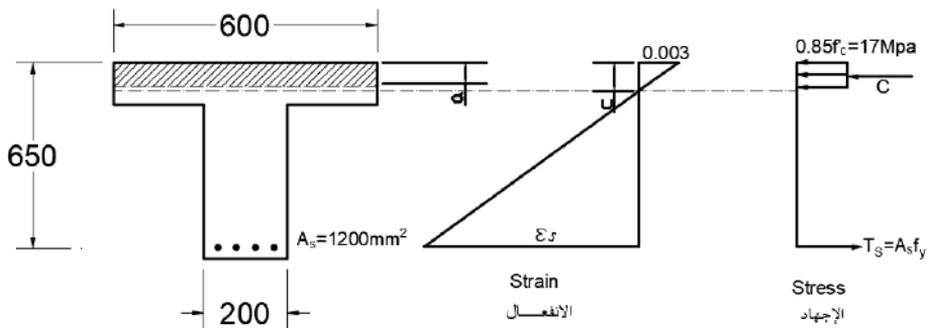
$$A_c = b_f \cdot t_f + x \cdot b = 600 \times 120 + 200x = 72000 + 200x$$

$$C = (72000 + 200x) \cdot 17 = 1224000 + 3400x$$

بتطبيق شرط التوازن:

$$C = T \Rightarrow 1224000 + 3400x = 432000 \Rightarrow x = -232.94 \text{ mm}$$

بما أنَّ قيمة x سالبة فهذا يعني أنَّ المحور المحايد يقع في الجناح ولا يقطع الجذع. وتكون عندما المساحة التي يغطيها بلوك الإجهاد المنتظم:



$$A_c = b_f \cdot a = 600a$$

$$C = (600a) \cdot 17 = 10200a$$

بتطبيق شرط التوازن:

$$C = T \Rightarrow 10200a = 432000 \Rightarrow a = 42.35mm < t_f = 120mm$$

موقع المحور المحايد:

$$c = a/0.85 = 49.8mm$$

موقع المحور المحايد التوازني:

$$c_b = \frac{630}{(630 + f_y)} d = \frac{630}{(630 + 360)} 650 = 413.64mm > c = 49.8mm$$

موقع المحور المحايد من أجل تسليح أعظم:

$$c_{\max} = \frac{1}{2} c_b = \frac{413.64}{2} = 206.8mm > c = 49.8mm$$

يُلاحظ وجود هامش أمان جيد بين التسليح الموجود والحالة العظمى.

2- التأكد من أن فولاذ الشد متلدن:

$$\varepsilon_s = 0.003 \frac{d - c}{c} = 0.003 \frac{650 - 49.8}{49.8} = 0.0362 > \varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{360}{210000} = 0.0017$$

3- العزم الذي يتحمله المقطع:

$$\begin{aligned} C &\Rightarrow 10200a = 4319700N = 4319.7kN \\ M_{ur} &= \Omega[C.y] = \Omega[C.(d - a/2)] \\ &= 0.9[4319.7 \times (650 - 42.35/2)] 10^{-3} = 2444.7kN.m \end{aligned}$$

مثال تطبيقي (5-9):

جائز من البيتون المسلح مستطيل المقطع $d=650mm, b=200mm$ مسلح بتسليح شد قدره

$A_s=1200mm^2$ ، والمطلوب إيجاد موقع المحور المحايد والعزم الذي يتحمله المقطع من أجل:

$$f_y = 360MPa \quad f'_c = 20MPa \quad -1$$

$$f_y = 360MPa \quad f'_c = 32MPa \quad -2$$

الحل:

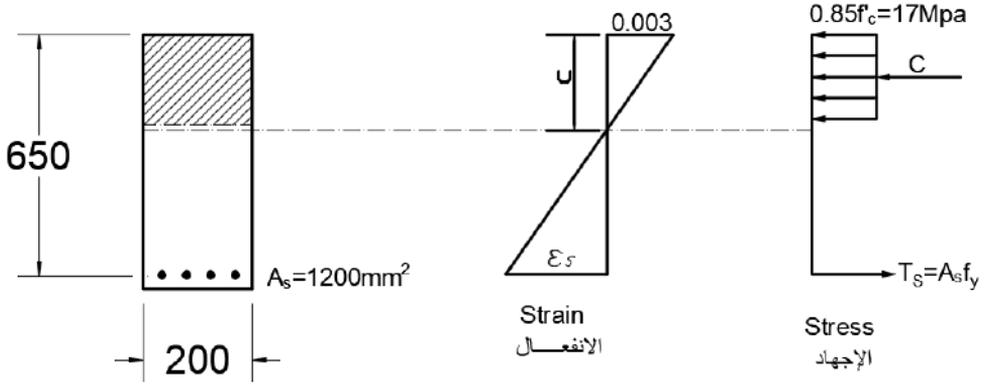
أولاً: المقاومة المميزة تساوي 20MPa:

1- موقع المحور المحايد:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{1200 \times 360}{0.85 \times 20 \times 200} = 127.06 \text{ mm} \Rightarrow c = a / 0.85 = 149.5 \text{ mm}$$

2- انفعال الفولاذ:

$$\epsilon_s = 0.003 \frac{d - c}{c} = 0.003 \frac{650 - 149.5}{149.5} = 0.01 > \epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{360}{210000} = 0.0017$$



3- العزم الذي يتحمله المقطع من أجل التسليح المفروض:

$$M_u = \Omega A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 0.9 \times 1200 \times 360 (650 - 127.06 / 2)$$

$$= 228.02 \times 10^6 \text{ N.mm} = 228 \text{ kN.m}$$

ثانياً: المقاومة المميزة تساوي 32MPa:

بما أن المقاومة المميزة للبيتون تتجاوز 28MPa وجب حساب النسبة β_1 :

$$\beta_1 = 0.85 - \frac{0.05(f'_c - 28)}{7} = 0.821$$

1- موقع المحور المحايد:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{1200 \times 360}{0.85 \times 32 \times 200} = 79.4 \text{ mm} \Rightarrow c = a / \beta_1 = 96.7 \text{ mm}$$

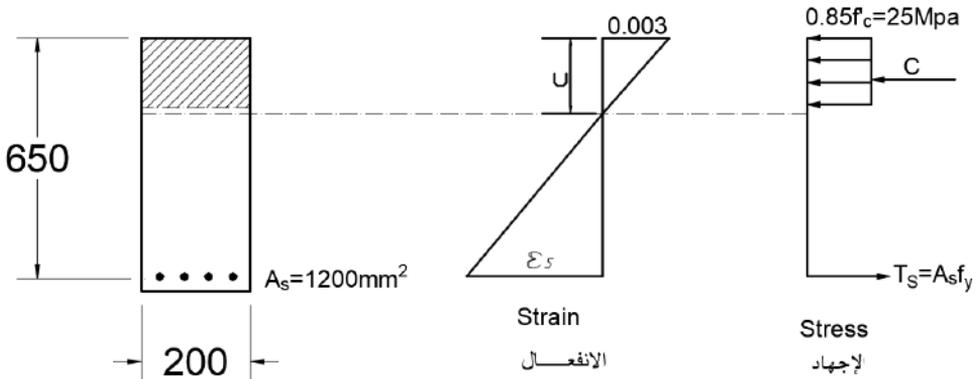
2- انفعال الفولاذ:

$$\varepsilon_s = 0.003 \frac{d-c}{c} = 0.003 \frac{650-96.7}{96.7} = 0.0172 > \varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{360}{210000} = 0.0017$$

3- العزم الذي يتحمله المقطع من أجل التسليح المفروض:

$$M_{ur} = \Omega A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 0.9 \times 1200 \times 360 \left(650 - 79.4 / 2 \right)$$

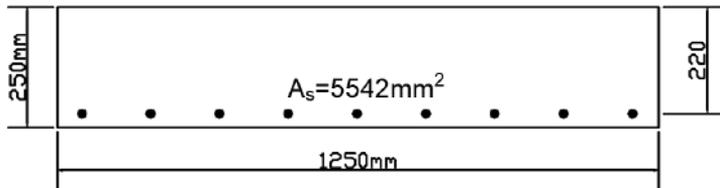
$$= 237.28 \times 10^6 \text{ N.mm} = 237.28 \text{ kN.m}$$



مثال تطبيقي (5-10):

جائز مخفي ضمن بلاطة معصبة (هوردي) أوجد العزم الحدي الذي يتحمله مقطعه المبين

بالشكل، علماً بأن مواصفات المواد: $f_y = 400 \text{ MPa}$ $f'_c = 25 \text{ MPa}$



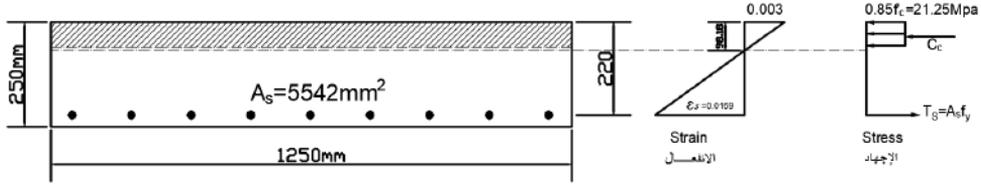
الحل:

1- موقع المحور المحايد:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{5542 \times 400}{0.85 \times 25 \times 1250} = 83.46 \text{ mm} \Rightarrow c = a / 0.85 = 98.18 \text{ mm}$$

2- انفعال الفولاذ:

$$\varepsilon_s = 0.003 \frac{d-c}{c} = 0.003 \frac{650-98.18}{98.18} = 0.0169 > \varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{400}{210000} = 0.0019$$



3- العزم الذي يتحمله المقطع من أجل التسليح المفروض:

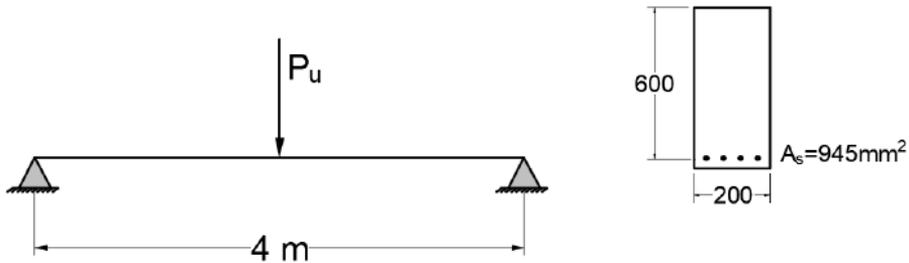
$$M_{ur} = \Omega A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 0.9 \times 5542 \times 400 \left(220 - 83.46 / 2 \right)$$

$$= 355.7 \times 10^6 \text{ N.mm} = 355.7 \text{ kN.m}$$

مثال تطبيقي (11-5):

أوجد الحمولة الحديدية العظمى P_u التي يستطيع تحملها مقطع الجائز المبين بالشكل، علماً بأن:

$$f'_c = 20 \text{ MPa} \quad f_y = 280 \text{ MPa} \quad \text{والأبعاد بالملمتر.}$$



الحل:

من أجل إيجاد الحمولة الحديدية التي يتحملها المقطع لابد من إيجاد العزم الحدي الذي يتحمله المقطع:

1- موقع المحور المحايد:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{945 \times 280}{0.85 \times 20 \times 200} = 77.82 \text{ mm} \Rightarrow c = a / 0.85 = 91.56 \text{ mm}$$

2- انفعال الفولاذ:

$$\varepsilon_s = 0.003 \frac{d-c}{c} = 0.003 \frac{600-91.56}{91.56} = 0.0167 > \varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{280}{210000} = 0.00133$$

3- العزم الذي يتحمله المقطع من أجل التسليح المفروض:

$$M_{ur} = \Omega A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 0.9 \times 945 \times 280 (600 - 77.82 / 2)$$

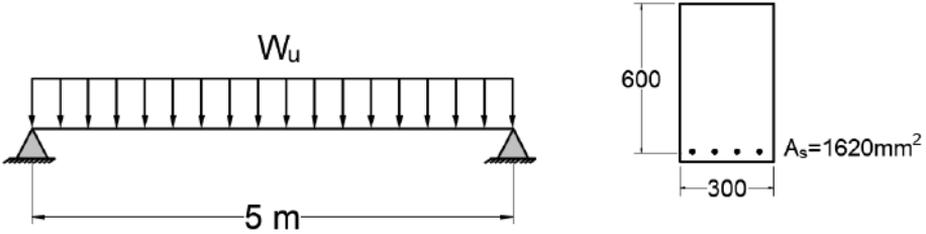
$$= 133.62 \times 10^6 \text{ N.mm} = 133.62 \text{ kN.m}$$

$$M_{ur} = \frac{P_{ur} L}{4} \Rightarrow P_{ur} = \frac{4 M_{ur}}{L} = \frac{4 \times 133.62}{4} = 133.62 \text{ kN}$$

مثال تطبيقي (5-12):

أوجد الحمولة الحديدية العظمى W_u التي يستطيع تحملها مقطع الجائز المبين بالشكل، علماً بأن:

$$f_y = 360 \text{ MPa} \quad f'_c = 22 \text{ MPa}$$



الحل:

من أجل إيجاد الحمولة الحديدية التي يتحملها المقطع لابد من إيجاد العزم الحدي الذي يتحمله المقطع:

1- موقع المحور المحايد:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{1620 \times 360}{0.85 \times 22 \times 300} = 103.96 \text{ mm} \Rightarrow c = a / 0.85 = 122.3 \text{ mm}$$

2- انفعال الفولاذ:

$$\varepsilon_s = 0.003 \frac{d-c}{c} = 0.003 \frac{600-122.3}{122.3} = 0.0117 > \varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{360}{210000} = 0.00171$$

3- العزم الذي يتحمله المقطع من أجل التسليح المفروض:

$$M_{ur} = \Omega A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 0.9 \times 1620 \times 360 (600 - 103.96/2)$$

$$= 287.65 \times 10^6 \text{ N.mm} = 287.65 \text{ kN.m}$$

$$M_{ur} = \frac{W_{ur} L^2}{8} \Rightarrow W_{ur} = \frac{8M_{ur}}{L^2} = \frac{8 \times 287.65}{25} = 92.05 \text{ kN/m}$$

مثال تطبيقي (5-13):

جائز من البيتون المسلح مقطعه مستطيل $H=700\text{mm}$, $d=650\text{mm}$, $b=250\text{mm}$ بتسليح قدره 1016mm^2 ذو إجهاد خضوع $f_y=300\text{MPa}$. تمّ تدعيمه بصفيحة من الفولاذ بسماكة 3mm وعرض 210mm وإجهاد خضوع $f_{yp}=360\text{MPa}$ تحقق من أن المقطع الجديد قادر على تحمل عزم حدي قدره $M_u=300\text{kN.m}$ علماً بأن $f'_c=20\text{MPa}$.

الحل:

1- إيجاد موقع المحور المحايد:

بفرض أن كل من قضبان التسليح والصفيحة متلدنان:

$$T_s = A_s f_y = 1016 \times 300 = 304800\text{N}$$

$$T_{sp} = A_{sp} f_y = 3 \times 210 \times 360 = 226800\text{N}$$

$$C = 0.85 f'_c b a = 0.85 \times 20 \times 250 a = 4250a$$

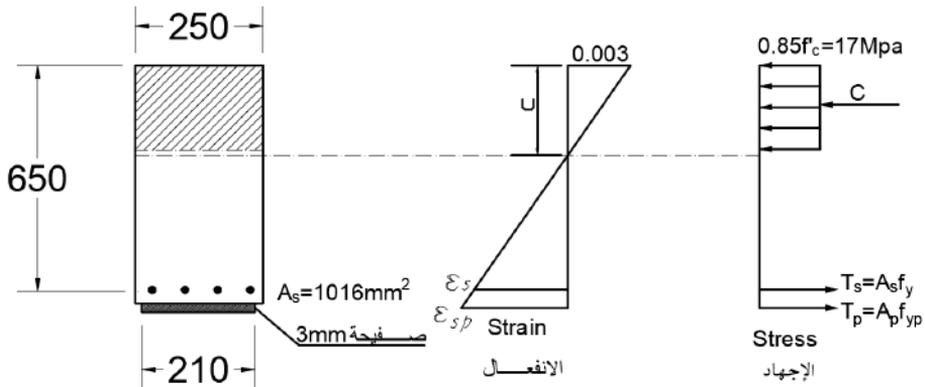
من توازن القوى:

$$C = T_s + T_p \Rightarrow 4250a = 304800 + 226800 = 531600$$

$$a = 125.08\text{mm} \Rightarrow c = a / 0.85 = 147.16\text{mm}$$

2- التأكد من تلدن قضبان التسليح والصفيحة:

$$\begin{aligned}\varepsilon_s &= 0.003 \frac{d-c}{c} = 0.003 \frac{650-147.16}{147.16} \\ &= 0.0103 > \varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{300}{210000} = 0.00143 \\ \varepsilon_{sp} &= 0.003 \frac{d_p-c}{c} = 0.003 \frac{701.5-147.16}{147.16} \\ &= 0.0113 > \varepsilon_y = \frac{f_{yp}}{E_s} = \frac{360}{210000} = 0.00171\end{aligned}$$



3- حساب العزم الذي يتحمله المقطع:

بأخذ العزوم حول مركز قوة الضغط C:

$$\begin{aligned}M_{ur} &= \Omega \left[T_s \left(d - \frac{a}{2} \right) + T_p \left(d_p - \frac{a}{2} \right) \right] \\ &= 0.9 \left[304.8 \left(650 - \frac{125.1}{2} \right) + 226.8 \left(701.5 - \frac{125.1}{2} \right) \right] 10^{-3} = 291.6 \text{ kN.m}\end{aligned}$$

بالنتيجة التدعيم بالصفحة أدى إلى تمكن المقطع من حمل العزم الحدي $M_u = 300 \text{ kN.m}$.

5-13 تصميم المقاطع البيتونية أحادية التسليح:

بغية تصميم مقطع بيتوني خاضع إلى انعطاف بسيط مسلح بتسليح أحادي، يجب معرفة مواصفات المواد f_y ، f'_c والمطلوب حساب أبعاد البيتون ومساحة التسليح. يتم فرض عرض المقطع البيتوني بحيث لا يقل عن 200mm حسب الكود السوري. ويبقى مجهولان هما d, A_s ، ويمكن فرض أحدهما للحصول على الآخر.

خطوات العمل:

1- إجراء الافتراضات اللازمة عند الضرورة:

- يتم فرض عرض الجانز b بحيث لا يقل عن 200mm.
- أو فرض الارتفاع الفعال d .
- فرض نسبة التسليح والقيمة $\mu_s = 0.01 = 1\%$ تكون مناسبة غالباً.
- 2- إذا كانت نسبة التسليح هي المطلوبة:
- يتم حساب الثوابت:

$$A_0 = \frac{M_u / \Omega}{bd^2 0.85 f'_c}$$

$$\alpha = 1 - \sqrt{1 - 2A_0}$$

$$\gamma = 1 - \frac{\alpha}{2}$$

- المقارنة مع قيمة α_{max} :

$$\alpha < \alpha_{max} = \frac{267.75}{630 + f_y}$$

- يتم حساب مساحة التسليح:

$$A_s = \frac{M_u / \Omega}{f_y \gamma d}$$

- المقارنة مع مساحات التسليح العظمى والدنيا:

$$\mu_{s \max} = \frac{1}{2} \mu_b = \frac{1}{2} \left[\frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} \right]$$

$$A_{s \max} = \frac{1}{2} A_{sb} = \frac{1}{2} \left[\frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} \right] bd$$

$$A_{s \min} = \frac{0.9}{f_y} bd \quad \mu_{s \min} = \frac{0.9}{f_y}$$

3- إذا كان الارتفاع الفعال هو المطلوب:

- يتم حساب مساحة التسليح A_s بدلالة الارتفاع الفعال d :

$$A_s = \mu_s bd = 0.01bd$$

- يتم حساب موقع المحور المحايد:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{\mu_s f_y}{0.85 f'_c} d$$

- حساب d من توازن العزم:

$$M_u = \Omega A_s f_y (d - a/2)$$

- حساب قيمة مساحة التسليح: $A_s = \mu_s bd = 0.01bd$

- المقارنة مع مساحات التسليح العظمى والدنيا:

$$A_{s \max} = \frac{1}{2} A_{sb} = \frac{1}{2} \left[\frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} \right] bd$$

$$A_{s \min} = \frac{0.9}{f_y} bd \quad \mu_{s \min} = \frac{0.9}{f_y}$$

5-14 أمثلة على تصميم المقاطع أحادية التسليح:

مثال تطبيقي (5-14):

جائز من البيتون المسلح مقطعه مستطيل بعرض قدره $b=250\text{mm}$ ، أحادي التسليح يخضع

إلى عزم قدره $M_u=150\text{kN.m}$. والمطلوب:

1- أوجد الارتفاع الفعال، مساحة التسليح، قارن التسليح مع القيمة العظمى والدنيا.

2- احسب العزم الأعظم الذي يتحمله المقطع M_{umax} .

$$f_y = 360MPa \quad f'_c = 20MPa$$

الحل:

• يتم حساب مساحة التسليح A_s بدلالة الارتفاع الفعال d :

$$A_s = \mu_s bd = 0.01bd = 2.5d$$

$$\mu_{smax} = \frac{1}{2} \mu_b = \frac{1}{2} \left[\frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} \right] = \frac{1}{2} \left[\frac{455}{630 + 360} \frac{20}{360} \right] = 0.0128 > 0.01$$

• يتم حساب موقع المحور المحايد:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{\mu_s f_y}{0.85 f'_c} d = \frac{0.01 \times 360}{0.85 \times 20} d = 0.2118d$$

• حساب d من توازن العزم:

$$M_u = \Omega A_s f_y (d - a/2) = 0.9 \times 2.5d \times 360 (d - 0.2118d/2)$$

$$150 \times 10^6 = 724.23d^2 \Rightarrow d = 455.09mm$$

نعتبر $d=500mm$

• حساب قيمة مساحة التسليح: $A_s = \mu_s bd = 0.01bd = 1250mm^2$

• المقارنة مع مساحات التسليح العظمى والدنيا:

$$A_{smax} = \mu_{smax} bd = 0.0128 \times 250 \times 500 = 1595.8mm^2$$

$$A_{smin} = \frac{0.9}{f_y} bd = 312.5mm^2$$

• حساب العزم الأعظم:

$$a_{max} = \frac{0.85}{2} \frac{630}{630 + f_y} = 135.2mm$$

$$M_{u_{\max}} = \Omega A_{s_{\max}} f_y \left(d - \frac{a_{\max}}{2} \right)$$

$$= 0.9 \times 1595.82 \times 360 (500 - 135.23/2) = 223.6 \times 10^6 \text{ N.mm} = 223.6 \text{ kN.m}$$

مثال تطبيقي (5-15):

جائز مستطيل من الببتون المسلح يخضع إلى عزم انعطاف قدره $M_u = 250 \text{ kN.m}$ ومسلح بتسليح قدره $A_s = 1320 \text{ mm}^2$ أوجد أبعاد المقطع العرضي، ثم احسب العزم الأعظم الذي يستطيع تحمّله

$$\cdot f_y = 300 \text{ MPa} \quad f'_c = 20 \text{ MPa} \quad \text{إذا علمت أن:}$$

الحل:

بفرض عرض الجائز يساوي $b = 200 \text{ mm}$.

- موقع المحور المحايد:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{1320 \times 300}{0.85 \times 20 \times 200} = 116.5 \text{ mm}$$

- حساب d من توازن العزم:

$$M_u = \Omega A_s f_y (d - a/2) = 0.9 \times 1320 \times 300 (d - 116.5/2) = 250 \times 10^6$$

$$d - 58.24 = 701.46 \Rightarrow d = 759.7 \text{ mm}$$

نعتبر $d = 800 \text{ mm}$

- المقارنة مع مساحات التسليح العظمى والدنيا:

$$A_{s_{\max}} = \frac{1}{2} \mu_b b d = \frac{1}{2} \left[\frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} \right] b d$$

$$= \frac{1}{2} \left[\frac{455}{630 + 300} \frac{20}{300} \right] 200 \times 800 = 2609.3 \text{ mm}^2 > 1320 \text{ mm}^2$$

$$A_{s_{\min}} = \frac{0.9}{f_y} b d = 480 \text{ mm}^2$$

- حساب العزم الأعظم:

$$a_{\max} = \frac{0.85}{2} \frac{630}{630 + f_y} = 230.3 \text{ mm}$$

$$M_{u \max} = \Omega A_{s \max} f_y \left(d - \frac{a_{\max}}{2} \right)$$

$$= 0.9 \times 2609.32 \times 300 (800 - 230.32 / 2) = 482.5 \times 10^6 \text{ N.mm} = 482.5 \text{ kN.m}$$

مثال تطبيقي (5-16):

جائز مستطيل من البيتون المسلح $b=250\text{mm}$, $d=700\text{mm}$ يخضع إلى العزم الحدي

$$M_u = 280 \text{ kN.m} \quad \text{أوجد التسليح إذا علمت أن: } f_c' = 20 \text{ MPa} \quad f_y = 280 \text{ MPa}$$

الحل:

• يتم حساب الثوابت:

$$A_0 = \frac{M_u / \Omega}{bd^2 0.85 f_c'} = \frac{280 \times 10^6 / 0.9}{250 \times 700^2 \times 0.85 \times 20} = 0.1494$$

$$\alpha = 1 - \sqrt{1 - 2A_0} = 1 - \sqrt{1 - 2(0.1494)} = 0.163$$

$$\gamma = 1 - \frac{\alpha}{2} = 1 - \frac{0.163}{2} = 0.9187$$

• المقارنة مع قيمة α_{\max} :

$$\alpha < \alpha_{\max} = \frac{267.75}{630 + f_y} = \frac{267.75}{630 + 280} = 0.294$$

• يتم حساب مساحة التسليح:

$$A_s = \frac{M_u / \Omega}{f_y \gamma d} = \frac{280 \times 10^6 / 0.9}{280 \times 0.9187 \times 700} = 1727.8 \text{ mm}^2$$

• المقارنة مع مساحات التسليح العظمى والدنيا:

$$A_{s\max} = \frac{1}{2} \mu_b bd = \frac{1}{2} \left[\frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} \right] bd$$

$$= \frac{1}{2} \left[\frac{455}{630 + 280} \frac{20}{280} \right] 250 \times 700 = 3125 \text{mm}^2 > 1727.8 \text{mm}^2$$

$$A_{s\min} = \frac{0.9}{f_y} bd = 562.5$$

مثال تطبيقي (5-17):

جائر مستطيل من الببتون المسلح $b=300\text{mm}$, $d=900\text{mm}$ يخضع إلى العزم الحدي

$M_u=480\text{kN.m}$. أوجد مساحة التسليح إذا علمت أن: $f'_c = 25\text{MPa}$ $f_y = 420\text{MPa}$.

الحل:

• حساب الثوابت:

$$A_0 = \frac{M_u / \Omega}{bd^2 0.85 f'_c} = \frac{480 \times 10^6 / 0.9}{300 \times 900^2 \times 0.85 \times 25} = 0.1033$$

$$\alpha = 1 - \sqrt{1 - 2A_0} = 1 - \sqrt{1 - 2(0.1033)} = 0.1093$$

$$\gamma = 1 - \frac{\alpha}{2} = 1 - \frac{0.1093}{2} = 0.945$$

• المقارنة مع قيمة α_{\max} :

$$\alpha < \alpha_{\max} = \frac{267.75}{630 + f_y} = \frac{267.75}{630 + 420} = 0.255$$

• يتم حساب مساحة التسليح:

$$A_s = \frac{M_u / \Omega}{f_y \gamma d} = \frac{480 \times 10^6 / 0.9}{420 \times 0.945 \times 900} = 1492.5 \text{mm}^2$$

• المقارنة مع مساحات التسليح العظمى والدنيا:

$$A_{s\max} = \frac{1}{2} \mu_b b d = \frac{1}{2} \left[\frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} \right] b d$$

$$= \frac{1}{2} \left[\frac{455}{630 + 420} \frac{25}{420} \right] 300 \times 900 = 3482.14 \text{mm}^2 > 1492.5 \text{mm}^2$$

$$A_{s\min} = \frac{0.9}{f_y} b d = 578.6$$

مثال تطبيقي (5-18):

جانر مستطيل المقطع معرض إلى عزم انعطاف قدره $M_u = 300 \text{kN.m}$ أوجد الارتفاع الفعال ومساحة التسليح والعزم الأعظم الذي يتحمّله المقطع إذا علمت أن:

$$f_y = 420 \text{MPa} \quad f'_c = 25 \text{MPa}$$

الحل:

- بفرض عرض المقطع $b = 200 \text{mm}$.
- يتم حساب مساحة التسليح A_s بدلالة الارتفاع الفعال d :

$$A_s = \mu_s b d = 0.01 b d = 2d$$

$$\mu_{s\max} = \frac{1}{2} \mu_b = \frac{1}{2} \left[\frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} \right] = \frac{1}{2} \left[\frac{455}{630 + 420} \frac{25}{420} \right] = 0.0129 > 0.01$$

- يتم حساب موقع المحور المحايد:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{\mu_s f_y}{0.85 f'_c} d = \frac{0.01 \times 420}{0.85 \times 25} d = 0.1976d$$

- حساب d من توازن العزم:

$$M_u = \Omega A_s f_y (d - a/2) = 0.9 \times 2d \times 420 (d - 0.1976d/2)$$

$$300 \times 10^6 = 681.29d^2 \Rightarrow d = 663.6 \text{mm}$$

نعتبر $d = 700 \text{mm}$

- حساب قيمة مساحة التسليح: $A_s = \mu_s bd = 0.01bd = 1400mm^2$

- المقارنة مع مساحات التسليح العظمى والدنيا:

$$A_{s\max} = \mu_{s\max} bd = 0.0129 \times 200 \times 700 = 1805.6mm^2$$

$$A_{s\min} = \frac{0.9}{f_y} bd = 300mm^2$$

- حساب العزم الأعظم:

$$a_{\max} = \frac{0.85}{2} \frac{630}{630 + f_y} = 178.5mm$$

$$M_{u\max} = \Omega A_{s\max} f_y \left(d - \frac{a_{\max}}{2} \right) = 0.9 \times 1805.6 \times 420 (700 - 178.5/2)$$

$$= 416.84 \times 10^6 N.mm = 416.84kN.m$$

مثال تطبيقي (5-19):

جائز مستطيل المقطع مقطعه الفعال $d=550mm$, $b=200mm$ يحمل عزم انعطاف قدره

$$M_u = 200kN.m \text{ والمطلوب حساب التسليح. } f_c' = 20MPa \quad f_y = 360MPa$$

الحل:

- يتّم حساب الثوابت:

$$A_0 = \frac{M_u / \Omega}{bd^2 0.85 f_c'} = \frac{200 \times 10^6 / 0.9}{200 \times 550^2 \times 0.85 \times 20} = 0.216$$

$$\alpha = 1 - \sqrt{1 - 2A_0} = 1 - \sqrt{1 - 2(0.216)} = 0.246$$

$$\gamma = 1 - \frac{\alpha}{2} = 1 - \frac{0.46}{2} = 0.877$$

- المقارنة مع قيمة α_{\max} :

$$\alpha < \alpha_{\max} = \frac{267.75}{630 + f_y} = \frac{267.75}{630 + 360} = 0.27$$

- يتّم حساب مساحة التسليح:

$$A_s = \frac{M_u / \Omega}{f_y \gamma d} = \frac{200 \times 10^6 / 0.9}{360 \times 0.877 \times 550} = 1280 \text{ mm}^2$$

• المقارنة مع مساحات التسليح العظمى والدنيا:

$$A_{s \max} = \frac{1}{2} \mu_b b d = \frac{1}{2} \left[\frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} \right] b d$$

$$= \frac{1}{2} \left[\frac{455}{630 + 360} \frac{20}{360} \right] 200 \times 550 = 1404 \text{ mm}^2 > 1280 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \min} = \frac{0.9}{f_y} b d = 275$$





الفصل السادس

المقاطع المستطيلة ثنائية التسليح المعرضة إلى انعطاف بسيط

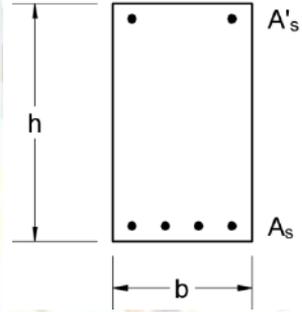
Doubly Reinforced Sections under Pure Bending

1-6 مقدمة:

إنّ المقاطع ثنائية التسليح هي المقاطع التي تحتوي على فولاذ مشدود وفولاذ مضغوط أيضاً. يكون تسليح الضغط ضرورياً عندما يكون الارتفاع مقيداً بمتطلبات معمارية. ولكن في الحقيقة من وجهة نظر اقتصادية فإنّ المقطع المسلح بتسليح شد فقط هو الأفضل. حسابياً عندما تتجاوز مساحة تسليح الشد القيمة العظمى التي يوصي بها الكود يجب عندها إضافة تسليح ضغط.

6-2 تأثيرات إضافة تسليح الضغط:

إنّ إضافة تسليح ضغط يمكن أن تغيّر نظام الانهيار من الانهيار بالضغط إلى الانهيار بالشد. بتعبير آخر يمكن أن تغيّر حالة المقطع البيتوني من مقطع ذي تسليح فوق توازني إلى تحت توازني. كذلك الأمر فإنّ وجود تسليح الضغط يفيد في تخفيض السهوم طويلة الأمد ويزيد في مطاوعة العنصر حيث يُنصح لأسباب اقتصادية ألا تزيد نسبة تسليح الضغط إلى تسليح الشد



الشكل (1-6) التسليح الثنائي

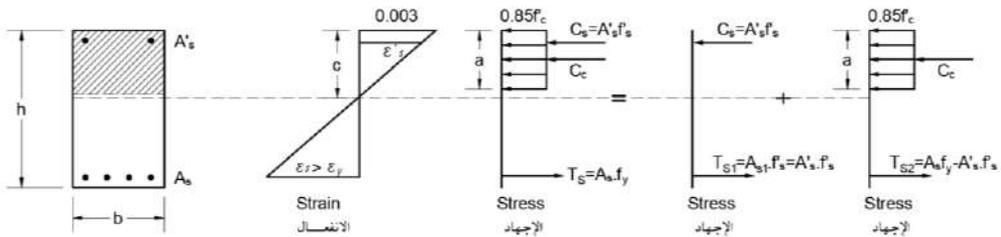
على 40%.

على الرغم من كل محاسن تسليح الضغط التي تمّ ذكرها فإنّ إضافة تسليح الضغط لا تزيد من العزم الذي يتحمله المقطع، وذلك لأنّ قوة الشد ثابتة $T = A_s \cdot f_y$ ، وكذلك الأمر فإنّ ذراع المزدوجة بين قوة الشد ومحصلة قوتي الضغط في البيتون والفولاذ يتأثر بشكل طفيف بإضافة قوة الضغط في الفولاذ. الجدير بالذكر أنّ إضافة تسليح الضغط تكون فعالة أكثر عندما تكون نسبة تسليح الشد قريبة من نسبة التسليح العظمى μ_{max} حيث ترفع قدرة تحمل الجائز للعزم بنسبة تتراوح بين 6-13%.

6-3 تحليل المقاطع المستطيلة ثنائية التسليح:

لدراسة توازن المقطع ثنائي التسليح المبين بالشكل، يتمّ اعتبار الانفعال في الليف العلوي للبيتون $\epsilon'_c = 0.003$ والانفعال في فولاذ الشد يتجاوز انفعال الخضوع $\epsilon_y \geq \epsilon_p$ وبطبيعة الحال الإجهاد في

فولاذ الشد يساوي إجهاد الخضوع $f_s = f_y$. بينما ليس بالضرورة أن يكون فولاذ الضغط قد وصل إلى حالة التلدن؛ أي إنَّ إجهاد تسليح الضغط f'_s غير معلوم.



الشكل (2-6) الانفعالات والإجهادات على المقطع المسلح بتسليح ثنائي

لتسهيل الدراسة يتم فصل المقطع الأساسي إلى مقطعين وهميين مكافئين بحث يُعطي مجموعهما المقطع الأساسي وبحيث يتحمل المقطع الوهمي الأول العزم الحدّي الإسمي M_{n1} والمقطع الوهمي الثاني العزم الحدّي الإسمي M_{n2} ويكون:

$$M_n = M_{n1} + M_{n2}$$

يتم تطبيق شرطي التوازن وهما: قوى الشد تساوي إلى قوى الضغط، العزم الخارجي يساوي إلى العزم الداخلي على المقطعين:

• المقطع الأول:

العزم الخارجي يساوي إلى العزم الداخلي حول محور مار من تسليح الضغط:

$$M_{n1} = A'_s f'_s (d - d')$$

مجموع القوى يساوي إلى الصفر:

$$T = C \Rightarrow A_{s1} f'_s = A'_s f'_s \Rightarrow A_{s1} = A'_s$$

أي إنَّ تسليح الشد في المقطع الوهمي الأول يساوي إلى تسليح الضغط.

d' : تغطية تسليح الضغط.

• المقطع الثاني:

العزم الخارجي يساوي إلى العزم الداخلي حول قوة الضغط C_c :

$$M_{n2} = (A_s f_y - A'_s f'_s) (d - a/2)$$

مجموع القوى المحورية يساوي إلى الصفر:

$$T = C \Rightarrow (A_s f_y - A'_s f'_s) = 0.85 f'_c a b$$

$$a = \frac{(A_s f_y - A'_s f'_s)}{0.85 f'_c b}$$

ويكون العزم الحدي التصميمي مساوياً إلى مجموع العزمين:

$$M_n = M_{n1} + M_{n2}; M_u = \Omega(M_{n1} + M_{n2})$$

$$M_u = \Omega [A'_s f'_s (d - d') + (A_s f_y - A'_s f'_s) (d - a/2)] \quad (1-6)$$

4-6 دراسة تلدن فولاذ الضغط:

يتم تمييز الحالتين:

أ. فولاذ الضغط متلدن Compression Steel Yields:

هذا يعني أن $f'_s = f_y$ ولمعرفة ذلك يتم إيجاد f'_s بدلالة a :

من شرط توافق الانفعالات - تشابه المثلثات:

$$\frac{\epsilon'_s}{c - d'} = \frac{0.003}{c} \Rightarrow \epsilon'_s = 0.003 \frac{c - d'}{c}$$

بتعويض قيمة c بلالة a :

$$\epsilon'_s = 0.003 \frac{a - 0.85d'}{a}$$

الإجهاد في تسليح الضغط:

$$f'_s = \epsilon'_s E_s = 630 \frac{a - 0.85d'}{a}$$

وبما أن فولاذ الضغط متلدن يكون $f'_s \geq f_y$:

$$f_y \leq \frac{630a - 535.5d'}{a} \Rightarrow f_y \cdot a \leq 630a - 535.5d' \Rightarrow \frac{d'}{a} \leq \frac{(630 - f_y)}{535.5}$$

أي أن:

$$\frac{d'}{a} \leq \frac{(630 - f_y)}{535.5} \quad (I) \quad (2-6)$$

بتعويض قيمة a :

$$\frac{d'}{a} = \frac{0.85f'_c b d'}{(A_s - A'_s)f_y} \leq \frac{(630 - f_y)}{535.5}$$

بالإصلاح:

$$\frac{0.85f'_c d'}{f_y} \frac{535.5}{(630 - f_y)} \leq \frac{(A_s - A'_s)}{b}$$

بالقسمة على d:

$$\frac{(A_s - A'_s)}{bd} \geq \frac{0.85f'_c d'}{f_y d} \frac{535.5}{(630 - f_y)} \quad (II) \quad (3-6)$$

وهو الشرط الوارد في الكود السوري من أجل تلدن فولاذ الضغط.

- بفرض أنه تمّ تسليح الشد إلى الحد الأقصى أي مساحة التسليح العظمى، عندها يكون المحور المحايد هو المحور المحايد الأعظم وتكون قيمة a:

$$a_{\max} = \frac{1}{2} \frac{535.5}{630 + f_y} d$$

بالتعويض في المعيار (I):

$$\frac{d'}{d} \frac{2(630 + f_y)}{535.5} \leq \frac{(630 - f_y)}{535.5}$$

$$\frac{d'}{d} \leq \frac{1}{2} \frac{(630 - f_y)}{(630 + f_y)} \quad (4-6)$$

بإعطاء قيم مختلفة لإجهاد الخضوع يتّم الحصول على الجدول (1-5) لتغيرات d'/d مع f_y:

الجدول (1-6) تغيرات d'/d مع f_y

400	360	300	280	240	f _y (MPa)
0.1	0.14	0.18	0.19	0.224	d'/d

ومنه يمكن الاستنتاج أنه من أجل d' = 0.05-0.1d يتلدن فولاذ الضغط من أجل أغلب قيم f_y المستعملة.

• العزم المقاوم عندما يكون فولاذ الضغط متلدناً:

$$a = \frac{(A_s - A'_s)f_y}{0.85f'_c b} \quad (5-6)$$

$$M_u = \Omega [A'_s f_y (d - d') + (A_s - A'_s) f_y (d - a/2)] \quad (III)$$

يُعطى العزم المقاوم عندما يكون فولاذ الضغط متلدناً في الكود السوري بالعلاقة:

$$M_u = \Omega f_y b d^2 \left[\frac{A'_s}{bd} \left(1 - \frac{d'}{d}\right) + \frac{(A_s - A'_s)}{bd} \left[1 - 0.59 \frac{(A_s - A'_s) f_y}{bd f'_c}\right] \right]$$

يمكن الحصول على هذه المعادلة كما يلي، بإصلاح العلاقة (III):

$$M_u = \Omega f_y [A'_s d - A'_s d' + (A_s - A'_s) d - (A_s - A'_s) a/2]$$

بتعويض a:

$$M_u = \Omega f_y \left[A'_s (d - d') + (A_s - A'_s) \left[d - \frac{(A_s - A'_s) f_y}{2 \times 0.85 f'_c b} \right] \right]$$

بإخراج bd^2 والإصلاح:

$$M_u = \Omega f_y b d^2 \left[\frac{A'_s}{bd} \left(1 - \frac{d'}{d}\right) + \frac{(A_s - A'_s)}{bd} \left[1 - 0.59 \frac{(A_s - A'_s) f_y}{bd f'_c}\right] \right] \quad (6-6)$$

ب. فولاذ الضغط غير متلدن Compression Steel Does not Yield

هذا يعني أن $f'_s < f_y$ وفي هذه الحالة يكون الشرط:

$$\frac{d'}{a} > \frac{(630 - f_y)}{535.5} \quad (7-6)$$

أي:

$$\frac{(A_s - A'_s)}{bd} < \frac{0.85 f'_c d'}{f_y d (630 - f_y)} \quad (8-6)$$

وتُحسب f'_s من العلاقة:

$$f'_s = 630 \frac{c - d'}{c} = 630 \frac{a - 0.85 d'}{a}$$

الانفعال في تسليح الضغط:

$$\varepsilon'_s = 0.003 \frac{c-d'}{c} = 0.003 \frac{a-0.85d'}{a}$$

بينما f_s فيتم التحقق من تجاوزها إجهاد الخضوع من العلاقة:

$$f_s = 630 \frac{c-d'}{c} = 630 \frac{a-0.85d'}{a} = f_y$$

الانفعال في تسليح الشد:

$$\varepsilon_s = 0.003 \frac{d-c}{c} = 0.003 \frac{0.85d-a}{a} > \varepsilon_y$$

5-6 مساحة التسليح القصوى في مقطع ثنائي التسليح:

بغية التأكد من الانهيار المطاوع للمقطع يجب أن يكون موقع المحور المحايد عند الانهيار مساوياً إلى cb وهي موقع المحور المحايد عند الانهيار في مقطع أحادي التسليح، لذلك يُسمح بزيادة A_{smax} بالمقدار A'_s فقط للمحافظة على قيمة c_{max} ذاتها.

أي يكون:

$$A_{smax} = \left[\frac{1}{2} \frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} bd + A'_s \right] \quad (9-6)$$

في حال كون f'_s غير متلدنة يكون:

$$A_{smax} = \left[\frac{1}{2} \frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} bd + A'_s \frac{f'_s}{f_y} \right]$$

حيث يؤخذ الإجهاد في تسليح الضغط f'_s عند الانهيار من العلاقة:

$$f'_{s_b} = 630 \left[1 - \frac{d'}{d} \frac{(630 + f_y)}{630} \right] \leq f_y$$

يتم الحصول عليها من تعويض a_b في معادلة f'_s :

$$a_b = \frac{535.5}{630 + f_y} d$$

$$f'_{sb} = 630 \frac{a_b - 0.85d'}{a_b} = 630 \frac{535.5d - 0.85d'(630 + f_y)}{535.5d}$$

$$f'_{sb} = 630 \frac{630d - d'(630 + f_y)}{630d} = 630 \left[1 - \frac{d'}{d} \left(\frac{630 + f_y}{630} \right) \right] \quad (10-6)$$

بيما يؤخذ الإجهاد في تسليح الضغط f'_s عند الوضع الأعظم من العلاقة:

$$f'_{s\max} = 630 \left[1 - \frac{d'}{d} \left(\frac{630 + f_y}{315} \right) \right] \leq f_y \quad (11-6)$$

$$a_{\max} = \frac{267.75}{630 + f_y} d \quad \text{حيث يُستنتج كما يلي:}$$

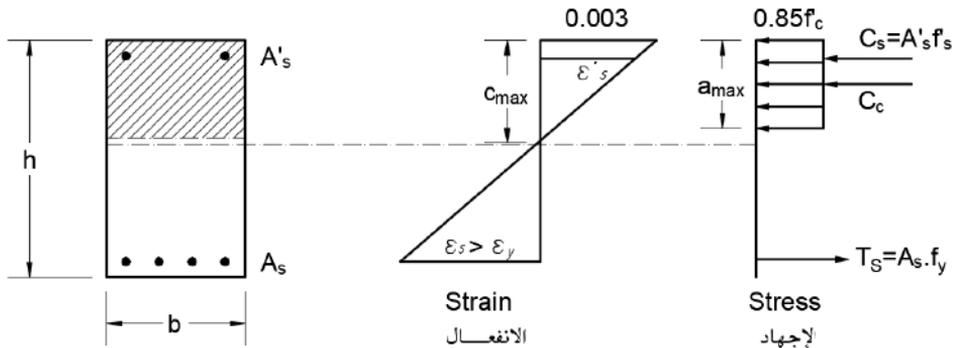
$$f'_{s\max} = 630 \frac{a_{\max} - 0.85d'}{a_{\max}} = 630 \frac{267.75d - 0.85d'(630 + f_y)}{267.75d}$$

$$f'_{s\max} = 630 \frac{315d - d'(630 + f_y)}{315d} = 630 \left[1 - \frac{d'}{d} \left(\frac{630 + f_y}{315} \right) \right]$$

6-6 العزم الأعظم الذي يتحمله مقطع ثنائي التسليح:

لحساب العزم الأعظم الذي يتحمله المقطع ثنائي التسليح المسلح بنسبة تسليح شد عظمى يتم

أخذ عزوم القوة المحورية حول مركز تسليح الشد:



الشكل (3-6) قوى الشد والضغط على المقطع المسلح بتسليح ثنائي

$$M_{u\max} = \Omega [C_c (d - a_{\max} / 2) + C_s (d - d')] \\ = \Omega [0.85 f'_c b a_{\max} (d - a_{\max} / 2) + A'_s f'_s (d - d')]$$

$$M_{u\max} = \Omega [0.85 f'_c b d^2 \alpha_{\max} (1 - \alpha_{\max} / 2) + A'_s f'_s (d - d')]$$

حيث يتم تحديد كون فولاذ الضغط متلدناً كما يلي:

$$\frac{d'}{a_{\max}} \leq \frac{(630 - f_y)}{535.5} \Rightarrow f'_{s\max} = f_y \quad \text{فولاذ الضغط متلدن:}$$

فولاذ الضغط غير متلدن:

$$\frac{d'}{a_{\max}} > \frac{(630 - f_y)}{535.5} \Rightarrow f'_{s\max} = 630 \frac{a_{\max} - 0.85d'}{a_{\max}}$$

- لا يجوز أن تزيد مساحة تسليح الضغط على مساحة تسليح الشد، وعموماً لا يُفضل أن تكون النسبة بينهما 20-40% لأسباب اقتصادية.
- إذا كانت مساحة تسليح الشد القصوى لمقطع أحادي التسليح $A_{s\max}$ فإن مساحة تسليح الشد القصوى لمقطع ثنائي التسليح يجب ألا تزيد على $1.5A_{s\max}$.
- يجب التأكد من أن مساحات التسليح تحقق الشرط $(A_s - A'_s) \leq \frac{1}{2} A_{sb}$

6-7 مسائل على حساب العزم الحدي الذي يتحمله مقطع ذو تسليح مفروض:

خطوات العمل:

- التحقق من تلدن فولاذ الضغط مبدئياً من العلاقة:

$$\frac{d'}{d} \leq \frac{1}{2} \frac{(630 - f_y)}{(630 + f_y)}$$

- حساب a وتحديد موقع المحور المحايد:

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0.85 f'_c b}$$

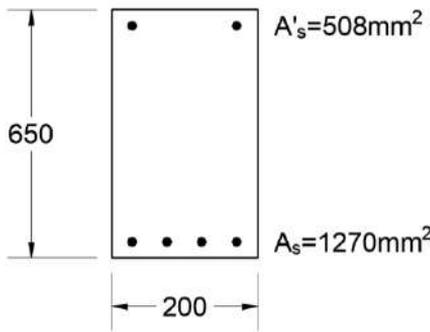
- التأكد من تحقق شرط التلدن:

$$\frac{d'}{a} \leq \frac{(630 - f_y)}{535.5}$$

• حساب العزم الحدّي الذي يتحمّله المقطع (العزم المقاوم):

$$M_{ur} = \Omega [A'_s f_y (d - d') + (A_s - A'_s) f_y (d - a/2)] \quad (12-6)$$

مثال تطبيقي (1-6):



أوجد العزم الحدّي الذي يتحمّله المقطع المبين بالشكل بأبعاد ملمترية، ثمّ احسب مساحة التسليح العظمى والعزم الأعظم الذي يتحمّله المقطع البيتوني. علماً أنّ تغطية كل من فولاذ الشد والضغط $d' = 50 \text{ mm}$.

$$f_y = 400 \text{ MPa} \quad f'_c = 20 \text{ MPa}$$

الحل:

- التحقق من تلدن فولاذ الضغط مبدئياً من العلاقة:

$$\frac{d'}{d} = \frac{50}{600} = 0.08333 \leq \frac{1}{2} \frac{(630 - f_y)}{(630 + f_y)} = 0.112$$

- حساب a وتحديد موقع المحور المحايد:

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{(1270 - 508) 400}{0.85 \times 20 \times 200} = 89.64 \text{ mm}$$

- التأكد من تحقق شرط التلدن:

$$\frac{d'}{a} = \frac{50}{89.64} = 0.558 > \frac{(630 - 400)}{535.5} = 0.429$$

فولاذ الضغط غير متلدن:

- يتمّ تعويض معادلة إجهاد الضغط في معادلة a وحل المعادلة لصالح المجهول a :

$$a = \frac{(A_s f_y - A'_s f'_s)}{0.85 f'_c b} \quad f'_s = 630 \frac{a - 0.85 d'}{a}$$

$$(0.85 f'_c b) a = A_s f_y - A'_s \left(630 \frac{a - 0.85 d'}{a} \right)$$

$$(0.85f'_c b)a^2 = A_s f_y a - 630A'_s a + 535.5d'A'_s$$

$$(0.85f'_c b)a^2 + (630A'_s - A_s f_y)a - 535.5d'A'_s = 0$$

معادلة من الدرجة الثانية لصالح a:

$$A = (0.85f'_c b) = 3400 \quad B = (630A'_s - A_s f_y) = -187960 \quad C = -535.5d'A'_s = -13.6 \times 10^6$$

$$a = 96.66 \text{ mm}$$

بحل المعادلة:

- التأكد من تلدن تسليح الضغط:

$$f'_s = 630 \frac{a - 0.85d'}{a} = 630 \frac{96.66 - 0.85 \times 50}{96.66} = 353.03 \text{ MPa} < f_y = 400 \text{ MPa}$$

والفولاذ المضغوط غير متلدن.

- حساب العزم الحدي الذي يتحمله المقطع:

$$M_{ur} = \Omega [A'_s f_y (d - d') + (A_s - A'_s) f_y (d - a/2)]$$

$$M_{ur} = 0.9 [508 \times 353 (600 - 50) + (1270 \times 400 - 508 \times 353) (600 - 96.66/2)] \times 10^{-6}$$

$$= 251.95 \text{ kN.m}$$

- مساحة التسليح العظمى:

$$a_{\max} = \frac{267.75}{630 + f_y} d = 155.97 \text{ mm}$$

$$f'_{s \max} = 630 \frac{a_{\max} - 0.85d'}{a_{\max}} = 458.33 > f_y = 400 \text{ MPa}$$

$$A_{s \max} = \left[\frac{1}{2} \frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} b d + A'_s \frac{f'_s}{f_y} \right]$$

$$= \left[\frac{1}{2} \frac{455}{(630 + 400)} \frac{20}{400} 200 \times 600 + 508 \right] = 1833.24 \text{ mm}^2 > A_s = 1270 \text{ mm}^2$$

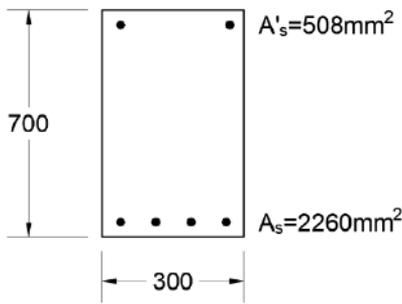
- العزم الذي يتحمله المقطع من أجل تسليح أعظم:

$$M_{u \max} = \Omega [0.85f'_c b a_{\max} (d - a_{\max}/2) + A'_s f'_s (d - d')] =$$

$$0.9 [0.85 \times 20 \times 200 \times 155.97 (600 - 155.97/2) + 508 \times 400 (600 - 50)] \times 10^{-6}$$

$$= 349.72 \text{ kN.m}$$

مثال تطبيقي (2-6):



تحقق من أن المقطع المبين بالشكل بأبعاد ملمترية يستطيع تحمل العزم الحدي $M_u = 400 \text{ kN.m}$ ، ثم احسب مساحة التسليح العظمى والعزم الأعظم الذي يتحمّله المقطع البيتوني. علماً أن تغطية كل من فولاذ الشد والضغط $d' = 50 \text{ mm}$

$$f_y = 360 \text{ MPa} \quad f'_c = 20 \text{ MPa}$$

الحل:

- التحقق من تلدن فولاذ الضغط مبدئياً من العلاقة:

$$\frac{d'}{d} = \frac{50}{650} = 0.0769 \leq \frac{1}{2} \frac{(630 - f_y)}{(630 + f_y)} = 0.136$$

- حساب a وتحديد موقع المحور المحايد:

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{(2260 - 508) 360}{0.85 \times 20 \times 300} = 123.67 \text{ mm}$$

- التأكد من تحقق شرط التلدن:

$$\frac{d'}{a} = \frac{50}{123.67} = 0.404 \leq \frac{(630 - 360)}{535.5} = 0.504$$

- حساب العزم الحدي:

$$M_{ur} = \Omega [A'_s f_y (d - d') + (A_s - A'_s) f_y (d - a/2)]$$

$$M_{ur} = 0.9 [508 \times 360 (650 - 50) + (2260 - 508) 360 (650 - 123.67/2)] \times 10^{-6} \\ = 432.63 \text{ kN.m} > 400 \text{ kN.m}$$

والمقطع قادر على تحمل العزم المفروض.

- مساحة التسليح العظمى باعتبار فولاذ الضغط متلدن:

$$A_{s\max} = \left[\frac{1}{2} \frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} b d + A'_s \frac{f'_s}{f_y} \right] = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{455}{(630 + 360)} \frac{20}{360} 300 \times 650 \right) + 508 \right]$$

$$= 2997.5 \text{mm}^2 > A_s = 2260 \text{mm}^2$$

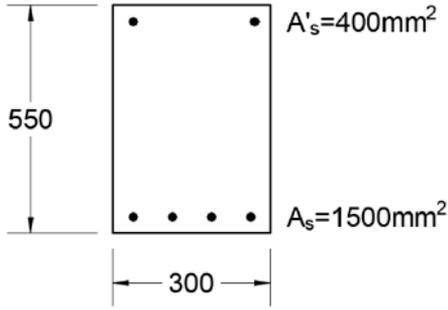
- العزم الذي يتحمله المقطع من أجل تسليح أعظم:

$$a_{\max} = \frac{267.75}{630 + f_y} d = 175.8 \text{mm}$$

$$M_{u\max} = \Omega [0.85 f'_c b a_{\max} (d - a_{\max} / 2) + A'_s f'_s (d - d')] =$$

$$0.9 [0.85 \times 20 \times 300 \times 175.8 (650 - 175.8 / 2) + 508 \times 360 (650 - 50)] 10^{-6} = 552.32 \text{kN.m}$$

مثال تطبيقي (3-6):



أوجد العزم الحدي الذي يتحمله المقطع المبين بالشكل بأبعاد ملمترية، ثم احسب مساحة التسليح العظمى والعزم الأعظم الذي يتحمله المقطع البيتوني. علماً أنّ تغطية كل من فولاذ الشد والضغط $d' = 60 \text{mm}$

$$f_y = 420 \text{MPa} \quad f'_c = 25 \text{MPa}$$

الحل:

- التحقق من تلدن فولاذ الضغط مبدئياً من العلاقة:

$$\frac{d'}{d} = \frac{60}{490} = 0.122 > \frac{1}{2} \frac{(630 - f_y)}{(630 + f_y)} = 0.1$$

- فولاذ الضغط غير متلدن. يتم تعويض معادلة إجهاد الضغط في معادلة a وحل المعادلة

لصالح المجهول a:

$$a = \frac{(A_s f_y - A'_s f'_s)}{0.85 f'_c b} \quad f'_s = 630 \frac{a - 0.85 d'}{a}$$

$$(0.85 f'_c b) a = A_s f_y - A'_s \left(630 \frac{a - 0.85 d'}{a} \right)$$

$$(0.85f'_c b)a^2 = A_s f_y a - 630A'_s a + 535.5d'A'_s$$

$$(0.85f'_c b)a^2 + (630A'_s - A_s f_y)a - 535.5d'A'_s = 0$$

معادلة من الدرجة الثانية لصالح a:

$$A = (0.85f'_c b) = 6375 \quad B = (630A'_s - A_s f_y) = -378000 \quad C = -535.5d'A'_s = -12852000$$

$$a = 83.45mm$$

بحل المعادلة:

- التأكد من تلدن تسليح الضغط:

$$f'_s = 630 \frac{a - 0.85d'}{a} = 630 \frac{83.45 - 0.85 \times 60}{83.45}$$

$$= 244.98MPa < f_y = 420MPa$$

والفولاذ المضغوط غير متلدن.

- حساب العزم الحدي الذي يتحمله المقطع:

$$M_{ur} = \Omega [A'_s f'_s (d - d') + (A_s f_y - A'_s f'_s) (d - a/2)]$$

$$M_{ur} = 0.9 [400 \times 245 (490 - 60) + (1500 \times 420 - 400 \times 245) (490 - 83.45/2)] 10^{-6}$$

$$= 252.6kN.m$$

- مساحة التسليح العظمى:

$$a_{max} = \frac{267.75}{630 + f_y} d = 124.95mm$$

$$f'_{smax} = 630 \frac{a_{max} - 0.85d'}{a_{max}} = 372.86 < f_y = 420MPa$$

$$A_{smax} = \left[\frac{1}{2} \frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} bd + A'_s \frac{f'_s}{f_y} \right] = \left[\frac{1}{2} \frac{455}{(630 + 420)} \frac{25}{420} 300 \times 490 + 400 \frac{372.86}{420} \right]$$

$$= 2250.9mm^2 > A_s = 1500mm^2$$

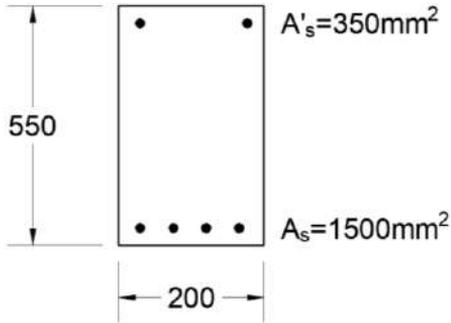
- العزم الذي يتحمله المقطع من أجل تسليح أعظم:

$$M_{u max} = \Omega [0.85f'_c b a_{max} (d - a_{max}/2) + A'_s f'_s (d - d')] =$$

$$0.9 [0.85 \times 25 \times 300 \times 124.95 (490 - 124.95/2) + 400 \times 372.86 (490 - 60)] 10^{-6}$$

$$= 364.2kN.m$$

مثال تطبيقي (4-6):



تحقق من أن المقطع المبين بالشكل بأبعاد مليمترية يستطيع تحمل العزم الحدي $M_u = 247 \text{ kN.m}$. علماً أن تغطية كل من فولاذ الشد والضغط $d' = 50 \text{ mm}$

$$f_y = 420 \text{ MPa} \quad f'_c = 22 \text{ MPa}$$

الحل:

- التحقق من تلدن فولاذ الضغط مبدئياً من العلاقة:

$$\frac{d'}{d} = \frac{50}{500} = 0.1 = \frac{1}{2} \frac{(630 - f_y)}{(630 + f_y)} = 0.1$$

- حساب a وتحديد موقع المحور المحايد:

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{(1500 - 350) 420}{0.85 \times 22 \times 200} = 129.14 \text{ mm} \approx 129 \text{ mm}$$

- التأكد من تحقق شرط التلدن:

$$\frac{d'}{a} = \frac{50}{129} = 0.387 \leq \frac{(630 - 420)}{535.5} = 0.392$$

- حساب العزم الحدي:

$$M_{ur} = \Omega [A'_s f_y (d - d') + (A_s - A'_s) f_y (d - a/2)]$$

$$M_{ur} = 0.9 [350 \times 420 (500 - 50) + (1500 - 350) 420 (500 - 129/2)] 10^{-6} \\ = 248.8 \text{ kN.m} > 247 \text{ kN.m}$$

والمقطع قادر على تحمل العزم المفروض.

مثال تطبيقي (5-6):

أعد حل المثال السابق بنفس المعطيات ولكن مع تغيير قيمة التغطية إلى $d' = 60 \text{ mm}$

الحل:

- التحقق من تلدن فولاذ الضغط مبدئياً من العلاقة:

$$\frac{d'}{d} = \frac{60}{500} = 0.12 > \frac{1}{2} \frac{(630 - f_y)}{(630 + f_y)} = 0.1$$

- فولاذ الضغط غير متلدن. يتم تعويض معادلة إجهاد الضغط في معادلة a وحل المعادلة لصالح المجهول a:

$$a = \frac{(A_s f_y - A'_s f'_s)}{0.85 f'_c b} \quad f'_s = 630 \frac{a - 0.85 d'}{a}$$

$$(0.85 f'_c b) a = A_s f_y - A'_s \left(630 \frac{a - 0.85 d'}{a} \right)$$

$$(0.85 f'_c b) a^2 = A_s f_y a - 630 A'_s a + 535.5 d' A'_s$$

$$(0.85 f'_c b) a^2 + (630 A'_s - A_s f_y) a - 535.5 d' A'_s = 0$$

معادلة من الدرجة الثانية لصالح a:

$$A = (0.85 f'_c b) = 3740 \quad B = (630 A'_s - A_s f_y) = -409500 \quad C = -535.5 d' A'_s = -11245500$$

$$a = 132.2 \text{ mm} \quad \text{بحل المعادلة:}$$

- التأكد من تلدن تسليح الضغط:

$$f'_s = 630 \frac{a - 0.85 d'}{a} = 630 \frac{132.2 - 0.85 \times 60}{132.2} = 387 \text{ MPa} < f_y = 420 \text{ MPa}$$

والفولاذ المضغوط غير متلدن.

- حساب العزم الحدي الذي يتحمله المقطع:

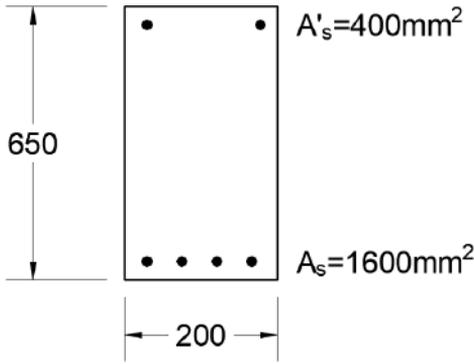
$$M_{ur} = \Omega [A'_s f'_s (d - d') + (A_s f_y - A'_s f'_s) (d - a/2)]$$

$$M_{ur} = 0.9 [350 \times 387 (500 - 60) + (1500 \times 420 - 350 \times 387) (500 - 132.2/2)] 10^{-6}$$

$$= 246.8 \text{ kN.m} < 247 \text{ kN.m}$$

والمقطع أصبح غير قادر على تحمل العزم المفروض.

مثال تطبيقي (6-6):



تحقق من أن المقطع المبين بالشكل بأبعاد ملامتية يستطيع تحمل العزم الحدّي $M_u = 300 \text{ kN.m}$ ، ثم احسب مساحة التسليح العظمى والعزم الأعظم الذي يتحمله المقطع البيتوني. علماً أنّ تغطية كل من فولاذ الشد والضغط $d' = 50 \text{ mm}$.

$$f_y = 360 \text{ MPa} \quad f'_c = 20 \text{ MPa}$$

الحل:

- التحقق من تلدن فولاذ الضغط مبدئياً من العلاقة:

$$\frac{d'}{d} = \frac{50}{650} = 0.0769 \leq \frac{1}{2} \frac{(630 - f_y)}{(630 + f_y)} = 0.136$$

- حساب a وتحديد موقع المحور المحايد:

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{(1600 - 400) 360}{0.85 \times 20 \times 200} = 127 \text{ mm}$$

- التأكد من تحقق شرط التلدن:

$$\frac{d'}{a} = \frac{50}{127} = 0.394 \leq \frac{(630 - 360)}{535.5} = 0.504$$

- حساب العزم الحدّي:

$$M_{ur} = \Omega [A'_s f_y (d - d') + (A_s - A'_s) f_y (d - a/2)]$$

$$M_{ur} = 0.9 [400 \times 360 (650 - 50) + (1600 - 400) 360 (650 - 127/2)] 10^{-6} \\ = 305.8 \text{ kN.m} > 300 \text{ kN.m}$$

والمقطع قادر على تحمل العزم المفروض.

- مساحة التسليح العظمى باعتبار فولاذ الضغط متلدن:

$$A_{s\max} = \left[\frac{1}{2} \frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} b d + A'_s \frac{f'_s}{f_y} \right] = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{455}{(630 + 360)} \frac{20}{360} 200 \times 650 \right) + 400 \right]$$

$$= 2059.7 \text{ mm}^2 > A_s = 1600 \text{ mm}^2$$

- العزم الذي يتحمله المقطع من أجل تسليح أعظم:

$$a_{\max} = \frac{267.75}{630 + f_y} d = 175.8 \text{ mm}$$

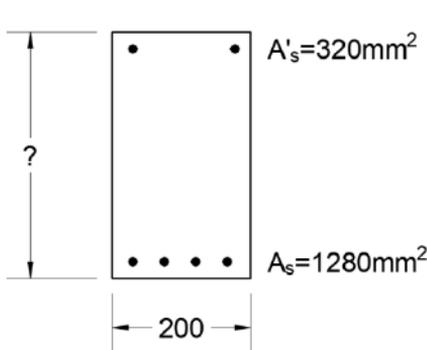
التحقق من تلدن فولاذ الضغط في الحالة العظمى:

$$f'_{s\max} = 630 \frac{a_{\max} - 0.85d'}{a_{\max}} = 477.7 > f_y = 360 \text{ MPa}$$

$$M_{u\max} = \Omega [0.85 f'_c b a_{\max} (d - a_{\max} / 2) + A'_s f'_s (d - d')] =$$

$$0.9 [0.85 \times 20 \times 200 \times 175.8 (650 - 175.8 / 2) + 400 \times 360 (650 - 50)] 10^{-6} = 380 \text{ kN.m}$$

مثال تطبيقي (6-7):



يتعرض المقطع المبين بالشكل بأبعاد ملمتريّة إلى العزم الحدي $M_u = 165 \text{ kN.m}$ والمطلوب أوجد الارتفاع الفعال d .

$$f_y = 280 \text{ MPa} \quad f'_c = 20 \text{ MPa} \quad d' = 50 \text{ mm}$$

الحل:

- حساب a بفرض كون تسليح الضغط متلدن:

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{(1280 - 320) 280}{0.85 \times 20 \times 200} = 79.06 \text{ mm}$$

$$\frac{d'}{a} = \frac{50}{79.06} = 0.63 \leq \frac{(630 - 280)}{535.5} = 0.65$$

- حساب d من معادلة العزم:

$$M_{ur} = \Omega [A'_s f_y (d - d') + (A_s - A'_s) f_y (d - a/2)]$$

$$165 \times 10^6 = 0.9 [320 \times 280 (d - 50) + (1280 - 320) 280 (d - 79/2)]$$

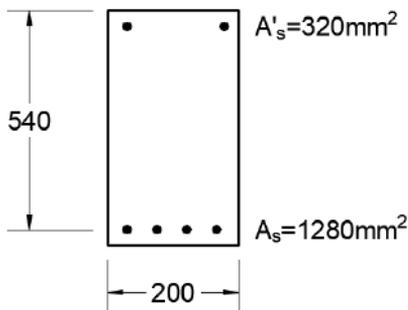
$$165 \times 10^6 = 80640 (d - 50) + 241920 (d - 39.53)$$

$$322560d = 178.6 \times 10^6 \Rightarrow d = 553.68 \text{ mm}$$

بفرض $d=600 \text{ mm}$

$$\frac{d'}{d} = \frac{50}{600} = 0.0833 \leq \frac{1}{2} \frac{(630 - f_y)}{(630 + f_y)} = 0.192$$

مثال تطبيقي (8-6):



أوجد العزم الحدي الذي يتحمّله المقطع المبين بالشكل، علماً أنّ الأبعاد بالملمتر.

$$f_y = 420 \text{ MPa} \quad f'_c = 30 \text{ MPa} \quad d' = 60 \text{ mm}$$

الحل:

- يُلاحظ أنّ المقاومة المميزة تتجاوز 28MPa.

- التحقق من تلدن فولاذ الضغط مبدئياً من العلاقة:

$$\frac{d'}{d} = \frac{50}{540} = 0.111 > \frac{1}{2} \frac{(630 - f_y)}{(630 + f_y)} = 0.1$$

- فولاذ الضغط غير متلدن. يتم تعويض معادلة إجهاد الضغط في معادلة a وحل المعادلة

لصالح المجهول a:

- الإجهاد في تسليح الضغط:

$$f'_s = 630 \frac{a - \beta_1 d'}{a}$$

$$\beta_1 = 0.85 - \frac{0.05(f'_c - 28)}{7} = 0.836$$

$$a = \frac{(A_s f_y - A'_s f'_s)}{0.85 f'_c b} \quad f'_s = 630 \frac{a - 0.836 d'}{a}$$

$$(0.85f'_c b)a = A_s f_y - A'_s \left(630 \frac{a - 0.836d'}{a} \right)$$

$$(0.85f'_c b)a^2 = A_s f_y a - 630A'_s a + 526.68d'A'_s$$

$$(0.85f'_c b)a^2 + (630A'_s - A_s f_y)a - 526.68d'A'_s = 0$$

معادلة من الدرجة الثانية لصالح a:

$$A = (0.85f'_c b) = 5100 \quad B = (630A'_s - A_s f_y) = -336000 \quad C = -526.68d'A'_s = -10108800$$

$$a = 88.32mm \quad \text{بحل المعادلة:}$$

$$\frac{d'}{a} = \frac{60}{88.32} = 0.68 \leq \frac{(630 - 420)}{\beta_1 630} = 0.3988$$

- التأكد من تادن تسليح الضغط:

$$f'_s = 630 \frac{a - 0.836d'}{a} = 630 \frac{88.32 - 0.836 \times 60}{88.32} = 272.34MPa < f_y = 420MPa$$

والفولاذ المضغوط غير متلدن.

- حساب العزم الحدي الذي يتحمله المقطع:

$$M_{ur} = \Omega [A'_s f_y (d - d') + (A_s - A'_s) f_y (d - a/2)]$$

$$M_{ur} = 0.9 [320 \times 272.34 (540 - 60) + (1280 \times 420 - 320 \times 272.34) (540 - 88.32/2)] 10^{-6}$$

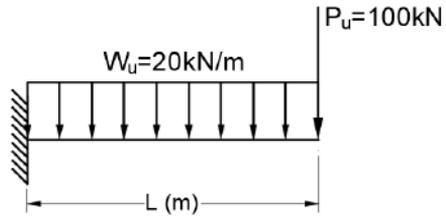
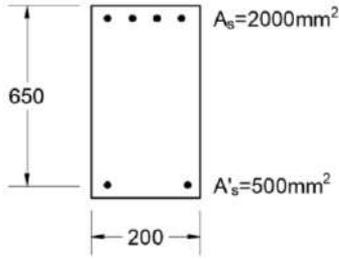
$$= 238.7kN.m$$

مثال تطبيقي (6-9):

جائز ظفري مقطعه مبين بالشكل بأبعاد مليمترية ومعلوم التسليح. المطلوب إيجاد طول الظفر

الأعظم من أجل تحمل الحمولات المبينة:

$$f_y = 360MPa \quad f'_c = 20MPa \quad d' = 50mm$$



الحل:

- التحقق من تلدن فولاذ الضغط مبدئياً من العلاقة:

$$\frac{d'}{d} = \frac{50}{650} = 0.0769 \leq \frac{1}{2} \frac{(630 - f_y)}{(630 + f_y)} = 0.136$$

- حساب a وتحديد موقع المحور المحايد:

$$a = \frac{(A_s - A'_s)f_y}{0.85f'_c b} = \frac{(2000 - 500)360}{0.85 \times 20 \times 200} = 158.8 \text{ mm}$$

- التأكد من تحقق شرط التلدن:

$$\frac{d'}{a} = \frac{50}{158.8} = 0.315 \leq \frac{(630 - 360)}{535.5} = 0.504$$

- حساب العزم الحدي:

$$M_{ur} = \Omega [A'_s f_y (d - d') + (A_s - A'_s) f_y (d - a/2)]$$

$$M_{ur} = 0.9 [500 \times 360 (650 - 50) + (2000 - 500) 360 (650 - 158.8/2)] 10^{-6} = 374.5 \text{ kN.m}$$

- معادلة العزم:

$$M_{ur} = \frac{W_u L^2}{2} + P_u L$$

$$\frac{20L^2}{2} + 100L = 374.5 \Rightarrow 10L^2 + 100L - 374.5 = 0$$

$$L = 2.90 \text{ m}$$

8-6 مسائل على حساب التسليح الثنائي من أجل مقاومة عزم مفروض في مقطع مستطيل

معلوم الأبعاد:

خطوات العمل:

- يتم حساب الثوابت:

$$A_0 = \frac{M_u / \Omega}{bd^2 0.85 f'_c}$$

$$\alpha = 1 - \sqrt{1 - 2A_0}$$

$$\gamma = 1 - \frac{\alpha}{2}$$

- المقارنة مع قيمة α_{\max} :

$$\alpha > \alpha_{\max} = \frac{267.75}{630 + f_y}$$

يجب إضافة تسليح ضغط أو زيادة أبعاد الجائز.

- من أجل إضافة تسليح ضغط يجب فرض أحد المجاهيل، لذلك يتم اعتبار المقطع الوهمي الثاني مسلحاً بنسبة تسليح عظمى من أجل مقطع أحادي التسليح (وهي القيمة الأكثر اقتصادية)، ثم يتم حساب العزم التصميمي الثاني M_{u2} الذي يتحمّله وهو مسلح بنسبة تسليح عظمى قدرها:

$$A_{s2} = (A_s - A'_s) = A_{s\max} = \frac{1}{2} \left(\frac{455}{630 + f_y} \right) \frac{f'_c}{f_y} bd$$

- حساب الثابت $A_{0\max}$ الذي يكافئ نسبة تسليح عظمى:

$$A_{0\max} = \alpha_{\max} (1 - \alpha_{\max} / 2)$$

- ويكون العزم التصميمي في المقطع الوهمي الثاني:

$$M_{u2} = \Omega 0.85 f'_c A_{0\max} bd^2$$

- العزم الذي يتحمّله المقطع الوهمي الأول المسلح بتسليح الضغط A'_s هو الفرق بين العزم الخارجي والعزم الخاص بالمقطع الوهمي الثاني:

$$M_{u1} = M_u - M_{u2}$$

• حساب التسليح:

○ تسليح الضغط:

$$A'_s = \frac{M_{u1} / \Omega}{f'_s (d - d')}$$

○ تسليح المقطع الوهمي الثاني:

$$A_{s2} = (A_s - A'_s) = \frac{M_{u2} / \Omega}{f_y \gamma_{\max} d} A_{s \max} = \frac{1}{2} \frac{455}{(630 + f_y)} \frac{f'_c}{f_y} bd$$

$$\gamma_{\max} = 1 - \frac{\alpha_{\max}}{2} \quad \text{حيث:}$$

$$A_s = A_{s2} + A'_s \frac{f'_s}{f_y} \quad \text{○ تسليح الشد:}$$

• مساحة التسليح العظمى:

$$A_{s \max} = \left[\frac{1}{2} \frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} bd + A'_s \frac{f'_s}{f_y} \right]$$

• حيث يؤخذ الإجهاد في تسليح الضغط f'_s عند الحلة العظمى من العلاقة:

$$f'_{s \max} = 630 \left[1 - \frac{d'}{d} \frac{(630 + f_y)}{315} \right] \leq f_y$$

• مساحة التسليح الدنيا:

$$A_{s \min} = \frac{0.9}{f_y} bd$$

مثال تطبيقي (6-10):

مقطع مستطيل من البيتون المسلح معرض إلى عزم انعطاف قدره $M_u = 230 \text{ kN.m}$. الارتفاع مفروض معمارياً ويساوي إلى 550 mm ، عرض المقطع $b = 200 \text{ mm}$ ، $d' = 50 \text{ mm}$ والمطلوب تصميم التسليح.

$$f_y = 360 \text{ MPa} \quad f'_c = 20 \text{ MPa}$$

الحل:

• يتم حساب الثوابت:

$$A_0 = \frac{M_u / \Omega}{bd^2 0.85 f'_c} = \frac{230 \times 10^6 / 0.9}{200 \times 500^2 \times 0.85 \times 20} = 0.3$$

$$\alpha = 1 - \sqrt{1 - 2A_0} = 1 - \sqrt{1 - 2(0.3)} = 0.369$$

$$\gamma = 1 - \frac{\alpha}{2} = 1 - \frac{0.369}{2} = 0.816$$

• المقارنة مع قيمة α_{\max} :

$$\alpha > \alpha_{\max} = \frac{267.75}{630 + f_y} = 0.27$$

يجب إضافة تسليح ضغط.

• قدرة تحمل المقطع مع تسليح شد أعظم وبدون تسليح ضغط:

حساب الثابت $A_{0\max}$ الذي يكافئ نسبة تسليح عظمى:

$$A_{0\max} = \alpha_{\max} (1 - \alpha_{\max} / 2) = 0.27(1 - 0.27 / 2) = 0.2339$$

ويكون العزم التصميمي من أجل تسليح شد أعظمي ودون تسليح ضغط:

$$M_{u2} = \Omega 0.85 f'_c A_{0\max} b d^2 = 0.9 \times 0.85 \times 20 \times 0.2339 \times 200 \times 500^2 \\ = 178.9 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

• العزم الفائض والذي يُسلح بتسليح ضغط:

$$M_{u1} = M_u - M_{u2} = 230 \times 10^6 - 178.9 \times 10^6 = 51.08 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

• حساب التسليح:

○ تسليح الضغط:

$$\frac{d'}{d} = \frac{50}{500} = 0.1 < \frac{1}{2} \frac{(630 - f_y)}{(630 + f_y)} = 0.136$$

وتسليح الضغط متلادن:

$$A'_s = \frac{M_{u1}/\Omega}{f'_s(d-d')} = \frac{M_{u1}/\Omega}{f_y(d-d')} = \frac{51.08/0.9}{360(500-50)} = 350.35\text{mm}^2$$

○ تسليح المقطع الوهمي الثاني:

$$\begin{aligned} A_{s2} &= (A_s - A'_s) = \frac{1}{2} \frac{455}{(630 + f_y)} \frac{f'_c}{f_y} bd \\ &= \frac{1}{2} \frac{455}{(630 + 360)} \frac{20}{360} 200 \times 500 = 1277.14\text{mm}^2 \end{aligned}$$

○ تسليح الشد الكلي:

$$A_s = A_{s2} + A'_s \frac{f'_s}{f_y} = 1277.14 + 350.35 = 1627\text{mm}^2$$

التحقق من تلدن فولاذ الضغط:

$$a = \frac{(A_s - A'_s)f_y}{0.85f'_c b} = \frac{(1627 - 350.5)360}{0.85 \times 20 \times 200} = 135.23\text{mm}$$

$$\frac{d'}{a} = \frac{50}{135.23} = 0.369 \leq \frac{(630 - 360)}{535.5} = 0.504$$

$$\frac{A'_s}{A_s} = \frac{350.35}{1627} = 0.215 = 21.5\% \Rightarrow \text{ok}$$

• مساحة التسليح العظمى:

$$f'_{s\max} = 630 \left[1 - \frac{d'}{d} \frac{(630 + f_y)}{315} \right] = 432\text{MPa} > f_y; f'_{s\max} = f_y$$

$$\begin{aligned} A_{s\max} &= \left[\frac{1}{2} \frac{455}{(630 + f_y)} \frac{f'_c}{f_y} bd + A'_s \frac{f'_s}{f_y} \right] \\ &= \left[\frac{1}{2} \frac{455}{(630 + 360)} \frac{20}{360} 200 \times 500 + 350.35 \right] = 1627\text{mm}^2 \end{aligned}$$

• مساحة التسليح الدنيا:

$$A_{s\min} = \frac{0.9}{f_y} bd = 250\text{mm}^2$$

مثال تطبيقي (6-11):

مقطع مستطيل من البيتون المسلح معرض إلى عزم انعطاف قدره $M_u=400\text{kN.m}$. الارتفاع يساوي إلى 650mm، عرض المقطع $b=250\text{mm}$ ، $d'=50\text{mm}$ والمطلوب تصميم التسليح.

$$f_y = 300\text{MPa} \quad f'_c = 20\text{MPa}$$

الحل:

- يتم حساب الثوابت:

$$A_0 = \frac{M_u / \Omega}{bd^2 0.85 f'_c} = \frac{400 \times 10^6 / 0.9}{250 \times 600^2 \times 0.85 \times 20} = 0.29$$

$$\alpha = 1 - \sqrt{1 - 2A_0} = 1 - \sqrt{1 - 2(0.29)} = 0.353$$

$$\gamma = 1 - \frac{\alpha}{2} = 1 - \frac{0.353}{2} = 0.824$$

- المقارنة مع قيمة α_{\max} :

$$\alpha > \alpha_{\max} = \frac{267.75}{630 + f_y} = 0.288$$

يجب إضافة تسليح ضغط.

- قدرة تحمل المقطع مع تسليح شد أعظم وبدون تسليح ضغط:

حساب الثابت $A_{0\max}$ الذي يكافئ نسبة تسليح عظمى:

$$A_{0\max} = \alpha_{\max} (1 - \alpha_{\max} / 2) = 0.287(1 - 0.287 / 2) = 0.246$$

ويكون العزم التصميمي من أجل تسليح شد أعظمي وبدون تسليح ضغط:

$$M_{u2} = \Omega 0.85 f'_c A_{0\max} b d^2 = 0.9 \times 0.85 \times 20 \times 0.246 \times 250 \times 600^2 \\ = 339.37 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

- العزم الفائض والذي يُسلح بتسليح ضغط:

$$M_{u1} = M_u - M_{u2} = 400 \times 10^6 - 339.37 \times 10^6 = 60.6 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

• حساب التسليح:

○ تسليح الضغط:

$$\frac{d'}{d} = \frac{50}{600} = 0.0833 < \frac{1}{2} \frac{(630 - f_y)}{(630 + f_y)} = 0.177$$

وتسليح الضغط متلادن:

$$A'_s = \frac{M_{u1} / \Omega}{f'_s (d - d')} = \frac{M_{u1} / \Omega}{f_y (d - d')} = \frac{60.626 / 0.9}{300(600 - 50)} = 408.255 \text{mm}^2$$

○ تسليح المقطع الوهمي الثاني:

$$\begin{aligned} A_{s2} &= (A_s - A'_s) = \frac{1}{2} \frac{455}{(630 + f_y)} \frac{f'_c}{f_y} bd \\ &= \frac{1}{2} \frac{455}{(630 + 300)} \frac{20}{300} 250 \times 600 = 2446.24 \text{mm}^2 \end{aligned}$$

○ تسليح الشد الكلي:

$$A_s = A_{s2} + A'_s \frac{f'_s}{f_y} = 2446.24 + 408.25 = 2855 \text{mm}^2$$

التحقق من تلادن فولاذ الضغط:

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{(2855.43 - 408.255) 300}{0.85 \times 20 \times 250} = 172.74 \text{mm}$$

$$\frac{d'}{a} = \frac{50}{172.74} = 0.289 \leq \frac{(630 - 300)}{535.5} = 0.616$$

$$\frac{A'_s}{A_s} = \frac{408.255}{2855} = 0.14 = 14\% \Rightarrow \text{ok}$$

• مساحة التسليح العظمى:

$$f'_{s \max} = 630 \left[1 - \frac{d'}{d} \frac{(630 + f_y)}{315} \right] = 475 \text{MPa} > f_y; f'_{s \max} = f_y$$

$$\begin{aligned} A_{s \max} &= \left[\frac{1}{2} \frac{455}{(630 + f_y)} \frac{f'_c}{f_y} bd + A'_s \frac{f'_s}{f_y} \right] \\ &= \left[\frac{1}{2} \frac{455}{(630 + 360)} \frac{20}{300} 250 \times 600 + 408.255 \right] = 2855 \text{mm}^2 \end{aligned}$$

- مساحة التسليح الدنيا:

$$A_{s\min} = \frac{0.9}{f_y} bd = 450\text{mm}^2 < A_s$$

ليس بالضرورة أن يكون تسليح الضغط أكبر من مساحة التسليح الدنيا كونه محسوب بشكل متوازن مع تسليح الشد.

مثال تطبيقي (6-12):

أعد حل المثال التطبيقي /2/ باعتماد مساحة تسليح شد $A_{s2}=0.75A_{s\max}$:

الحل:

- قدرة تحمل المقطع مع تسليح شد $75\% A_{s\max}$ وبدون تسليح ضغط:
حساب الثابت A_0 الذي يكافئ نسبة تسليح عظمى:

$$A_0 = 0.75\alpha_{\max} (1 - 0.75\alpha_{\max} / 2) \\ = 0.75 \times 0.287 (1 - 0.75 \times 0.287 / 2) = 0.192$$

ويكون العزم التصميمي من أجل تسليح شد أعظمي وبدون تسليح ضغط:

$$M_{u2} = \Omega 0.85 f'_c A_0 b d^2 \\ = 0.9 \times 0.85 \times 20 \times 0.192 \times 250 \times 600^2 = 265.23 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

- العزم الفائض والذي يُسلح بتسليح ضغط:

$$M_{u1} = M_u - M_{u2} = 400 \times 10^6 - 265.23 \times 10^6 = 134.77 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

- حساب التسليح:

○ تسليح الضغط:

تسليح الضغط متلدن:

$$A'_s = \frac{M_{u1} / \Omega}{f'_s (d - d')} = \frac{M_{u1} / \Omega}{f_y (d - d')} = \frac{134.77 / 0.9}{300(600 - 50)} = 907.55\text{mm}^2$$

○ تسليح المقطع الوهمي الثاني:

$$A_{s2} = (A_s - A'_s) = 0.75 \frac{1}{2} \frac{455}{(630 + f_y)} \frac{f'_c}{f_y} bd$$

$$= 0.75 \frac{1}{2} \frac{455}{(630 + 300)} \frac{20}{300} 250 \times 600 = 1835.4 \text{mm}^2$$

○ تسليح الشد الكلي:

$$A_s = A_{s2} + A'_s \frac{f'_s}{f_y} = 1835.4 + 907.55 = 2743 \text{mm}^2$$

التحقق من تلدن فولاذ الضغط:

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{(2743 - 907.55) 300}{0.85 \times 20 \times 250} = 129.56 \text{mm}$$

$$\frac{d'}{a} = \frac{50}{129.56} = 0.386 \leq \frac{(630 - 300)}{535.5} = 0.616$$

$$\frac{A'_s}{A_s} = \frac{907.55}{2743} = 0.33 = 33\% \Rightarrow \text{ok}$$

• مساحة التسليح العظمى:

$$f'_{s \max} = 630 \left[1 - \frac{d'}{d} \frac{(630 + f_y)}{315} \right] = 475 \text{MPa} > f_y; f'_{s \max} = f_y$$

$$A_{s \max} = \left[\frac{1}{2} \frac{455}{(630 + f_y)} \frac{f'_c}{f_y} bd + A'_s \frac{f'_s}{f_y} \right]$$

$$= \left[\frac{1}{2} \frac{455}{(630 + 360)} \frac{20}{300} 250 \times 600 + 907.55 \right] = 3354 \text{mm}^2$$

• مساحة التسليح الدنيا:

$$A_{s \min} = \frac{0.9}{f_y} bd = 450 \text{mm}^2 < A_s$$

الفصل السابع

الجزان ذات المقطع T

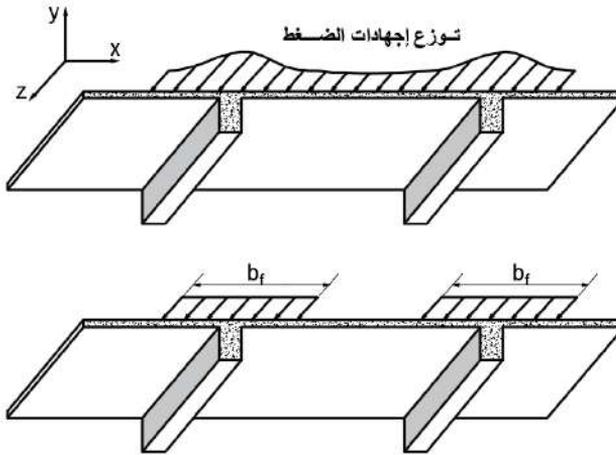
T-sections Beams

1-7 مقدمة:

تتألف مباني البيتون المسلح عادة من جيزان وبلاطات مصبوبة مع بعضها بشكل ميليثي Monolithically Casted. إن ذلك يجعل الجيزان والبلاطات تعمل مع بعضها بشكل مشترك من أجل مقاومة الحمولات المطبقة، ونتيجة لذلك يُضاف إلى الجائز ذي المقطع المستطيل جزء علوي يسمّى الجناح Flange، ويسمى جزء الجائز الواقع تحت البلاطة بالجزع Web. يكون مقطع الجائز في هذه الحالة بشكل T.

2-7 العرض الفعال للجناح في الجيزان الحاملة لبلاطات مليئة:

إنّ توزّع إجهادات الضغط في الجناح يكون كما هو موضح في الشكل حيث يُلاحظ أنّ إجهاد الضغط يكون أعظماً عند محور الجائز وأصغرياً عند المحاور بين الجيزان المتجاورة. إنّ تحليل الإجهادات بهذا التوزيع صعب للغاية لذلك يتمّ استبدال هذا التوزيع بمستطيل مكافئ ذي عرض يساوي إلى b_f ، ويسمى العرض الفعّال للجناح أو طاولة الضغط. وتكون محصلة الإجهادات على العرض b مكافئة إلى محصلة الإجهادات على العرض b_f .



الشكل (1-7) توزيع إجهادات الضغط على الجيزان

يُعطى الكود العربي السوري العرض الفعال للجناح من أجل حسابات التسليح بالقيمة الدنيا بين

القيم الثلاث:

$$b_f = \min \begin{cases} L_e / 4, L_e / 5 \\ 12t_f + b_w \\ D \min \end{cases} \quad (1-7)$$

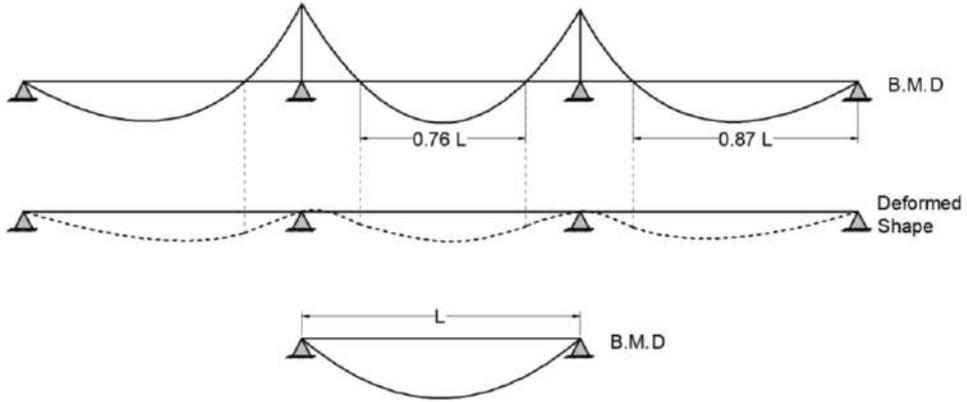
L_e : المسافة بين نقطتي الانعطاف في الشكل المتشوه (أو نقطتي انعدام العزم) في المجاز، وتؤخذ

حسب الكود السوري:

- 0.76L من أجل المجازات الداخلية.
- 0.87L من أجل المجازات الطرفية.
- L من أجل جائر بسيط (وحيد المجاز).

L الطول المحوري للمجاز.

- $L_e / 4$: من أجل حمولات موزعة مسيطرة (عزمها هو الأكبر).
- $L_e / 5$: من أجل حمولات مركزة مسيطرة (عزمها هو الأكبر).

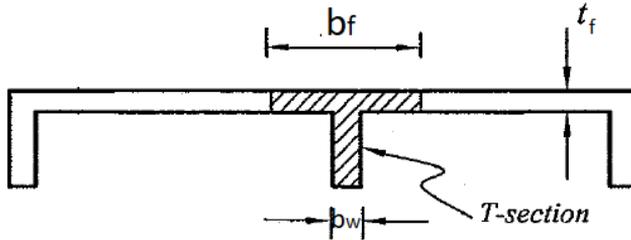
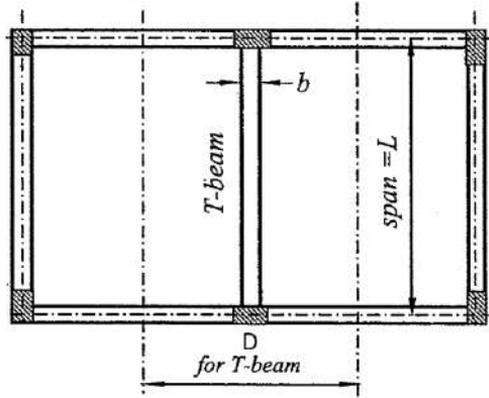


الشكل (2-7) المسافة بين نقطتي انعدام العزم

t_f : سماكة الجناح.

b_w : عرض الجذع.

D : المسافة بين الجيزان المتجاورة.



الشكل (3-7) الجائز مقطع T

وتؤخذ قيمة عرض الجناح الفعال من أجل حساب عزم العطالة ومن أجل الجيزان مسبقاً الصنع:

$$b_f = \min \begin{cases} L_e / 4, L_e / 5 \\ 6t_f + b_w \\ D \end{cases} \quad (2-7)$$

تعدُّ الجيزان الوسطية بشكل T والجيزان الطرفية بشكل مستطيل بدل L للأمان.

3-7 السماكة الدنيا للجناح:

أ. يجب ألا تقل السماكة الدنيا للجناح (سماكة البلاطة) عن $1/10$ من العمق الكلي للمقطع

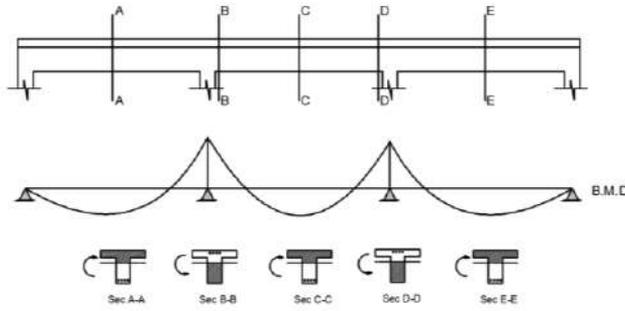
وإلا يُعتبر الجائز ذو مقطع مستطيل بعرض يساوي عرض الجذع b_w ويُهمل الجناح.

ب. في الجيزان بشكل T التي يوجد فيها بلاطة مستقلة لتأمين الضغط. إضافة للشرط السابق

يجب ألا تقل سماكة البلاطة المستقلة عن نصف عرض الجذع $b_w/2$.

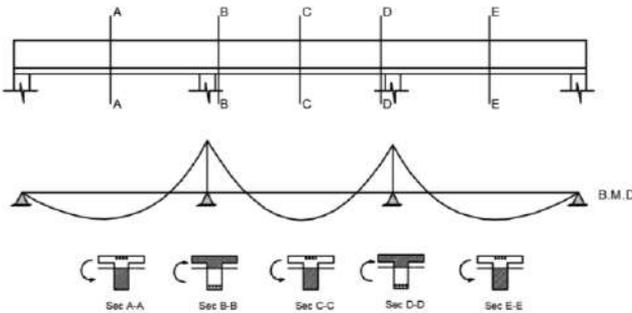
4-7 سلوك المقطع بحسب موقعه من الجائز:

يتغير سلوك المقطع بحسب موقعه من الجائز، فالمقاطع المعرضة إلى عزم موجب تكون المنطقة المضغوطة فيها هي منطقة بشكل T وبالتالي يسلك المقطع سلوك مقطع T. في حين تكون المنطقة المضغوطة بشكل مستطيل عرضه b_w في المقاطع المعرضة إلى عزوم سالبة، وبما أن المنطقة المشدودة في البيتون مهمة فإن المقطع في حالة العزوم السالبة يُدرس كمقطع مستطيل عرضه b_w .



الشكل (4-7) سلوك المقطع T بحسب موقعه من الجائز

لنأخذ على سبيل المثال الجائز المستمر المبين بالشكل، بحسب إشارة عزم الانعطاف فإن المقاطع A-A, C-C, E-E تقاوم عزم انعطاف موجب، وبالتالي يقع الجناح في منطقة الضغط ويكون المقطع المدروس بشكل T في هذه الحالات. بينما المقطع B-B, D-D فتتعرض إلى عزوم سالبة وبالتالي فإن الجناح مشدود ويُهمل في الدراسة ويصمم المقطع بشكل مستطيل عرضه b_w .



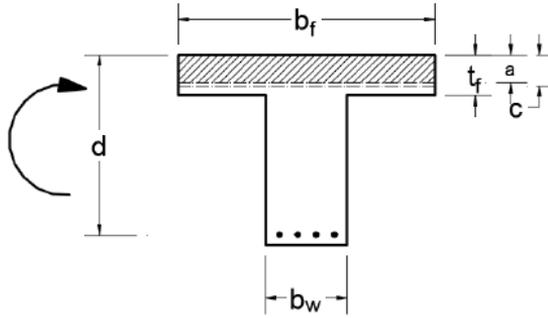
الشكل (5-7) سلوك المقطع T المقلوب بحسب موقعه من الجائز

عندما يكون الجائز مقلوباً أي البلاطة من الأسفل. تتعكس كل الاعتبارات السابقة. من الشكل يُلاحظ أن المقطع A-A المعرض إلى عزم موجب ذي جناح مشدود، بينما المقطع B-B المعرض إلى

عزم انعطاف سالب فهو ذو جناح مضغوط. بالنتيجة المقطع A-A يسلك سلوك مقطع مستطيل بينما المقطع B-B يعمل بشكل مقطع T.

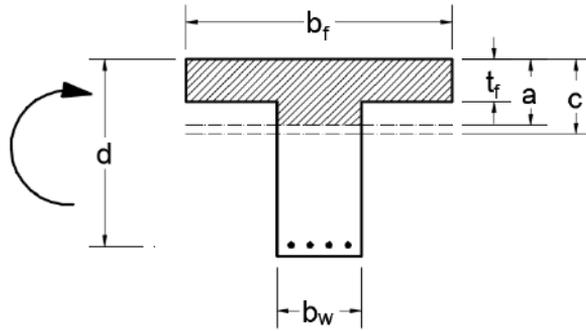
عندما يعمل المقطع كمقطع مستطيل عرضه b_w يصمم كما في الفصل الخامس والسادس. أمّا عندما يعمل المقطع بشكل T فإنه يمكن التمييز بين الحالتين التاليتين للمحور المحايد (المحور السليم).

أ. المحور المحايد ضمن الجناح:



الشكل (6-7) المحور المحايد ضمن جناح الجائز مقطع T

ب. المحور المحايد ضمن الجذع:



الشكل (7-7) المحور المحايد ضمن جذع الجائز مقطع T

5-7 تحليل المقاطع بشكل T :Analysis of T Sections

إنَّ أول خطوة في دراسة المقاطع بشكل T هي تحديد موقع المحور المحايد. هل هو واقع ضمن الجناح أم الجذع؟ من أجل معرفة ذلك، يتم حساب العزم الذي يتحمّله الجناح عندما يكون مضغوطاً بالكامل M_{d0} كما في الشكل:

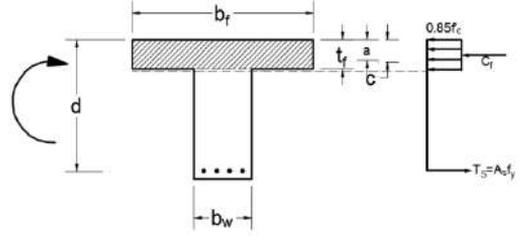
أي تكون $a = t_f$

تُعطى علاقة العزم الحدي:

$$M_{d0} = \Omega 0.85 f'_c b_f t_f a (d - t_f / 2)$$

بتعويض قيمة a :

$$M_{d0} = \Omega 0.85 f'_c b_f t_f (d - t_f / 2)$$



الشكل (7-8) حالة الجناح المضغوط بالكامل

عندما يكون العزم الحدي التصميمي المطبق

أقل من العزم الذي يتحمّله الجناح M_{d0} يكون المحور المحايد أعلى من المحور المبيّن بالشكل، أي $a < t_f$ وبالتالي يسلك المقطع سلوك مقطع مستطيل عرضه b_f . بينما عندما يكون العزم الحدي التصميمي أكبر من M_{d0} يكون المحور المحايد أخفض من المحور المبيّن بالشكل أي يكون $a > t_f$ وبالتالي يسلك المقطع سلوك مقطع T أي كل من الجناح والجذع يشاركان في مقاومة الإجهادات.

أ. عندما يكون المحور المحايد ضمن الجناح $a \leq t_f, M_u \leq M_{d0}$

يسلك المقطع في هذه الحالة سلوك مقطع مستطيل عرضه b_f وارتفاعه الفعال d ، وبالتالي تسري عليه حسابات تسليح مقطع مستطيل:

• يتم حساب الثوابت:

$$A_0 = \frac{M_u / \Omega}{b_f d^2 0.85 f'_c} \quad \alpha = 1 - \sqrt{1 - 2A_0} \quad \gamma = 1 - \frac{\alpha}{2}$$

• المقارنة مع قيمة α_{max} :

$$\alpha < \alpha_{max} = \frac{267.75}{630 + f_y}$$

• يتم حساب مساحة التسليح:

$$A_s = \frac{M_u / \Omega}{f_y \gamma d}$$

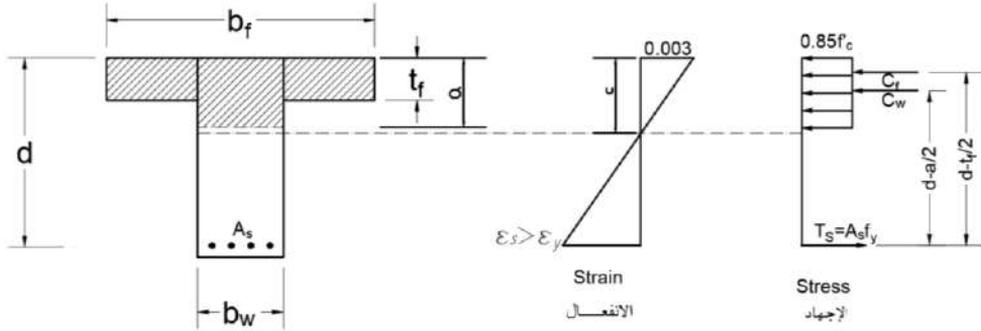
• المقارنة مع مساحة التسليح الدنيا:

$$A_{smin} = \frac{0.9}{f_y} b_w d$$

إنَّ مساحة التسليح العظمى الخاصة بالمقطع T تختلف عن تلك الخاصة بالمقطع المستطيل؛ إذ يجب تحديد موقع المحور المحايد التوازني هل هو ضمن الجناح أم الجذع.

ب. عندما يكون المحور المحايد ضمن الجذع $a > t_f, M_u > M_{d0}$:

هنا يكون العزم الخارجي المطبق كبيراً ممّا يؤدي إلى وجود المحور المحايد أسفل الجناح حيث يُساهم جزء من الجذع في مقاومة هذا العزم. ويكون شكل منطقة الضغط بشكل T. للتبسيط تتم تجزئة منطقة الضغط إلى جزأين كل منهما مستطيل، هما جزأي الجناح بأبعاد $t_f, (b_f - b_w)$ والجذع بأبعاد a, b_w كما هو موضَّح في الشكل:



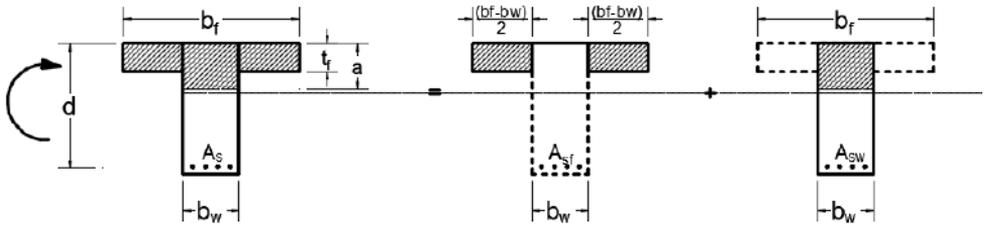
الشكل (7-9) المحور المحايد ضمن جذع الجانز مقطع T

إنَّ التسليح الكلي يساوي إلى مجموع التسليحين في المقطع الأول (جزأي الجناح) والمقطع الثاني (الجذع):

$$A_s = A_{sf} + A_{sw}$$

كذلك الأمر العزم الحدّي المطبق يساوي إلى مجموع العزمين في المقطعين:

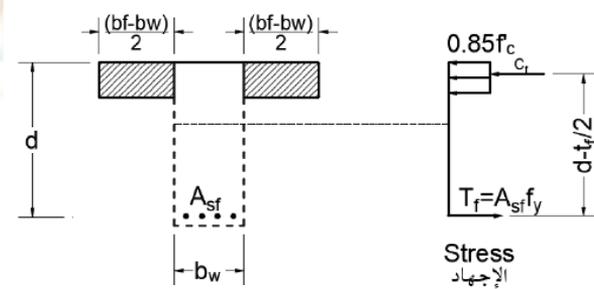
$$M_u = M_{uf} + M_{uw}$$



الشكل (10-7) تجزئة مقطع الجائز T إلى مقطعين

أ. دراسة المقطع الأول:

- يتم حساب العزم الذي يتحمله بيتون الأجنحة وذلك بأخذ مجموع العزوم حول القوة T_s في الفولاذ.



الشكل (11-7) الإجهادات على الجناحين

$$M_{uf} = \Omega 0.85 f'_c t_f (b_f - b_w) (d - t_f / 2) \quad (3-7)$$

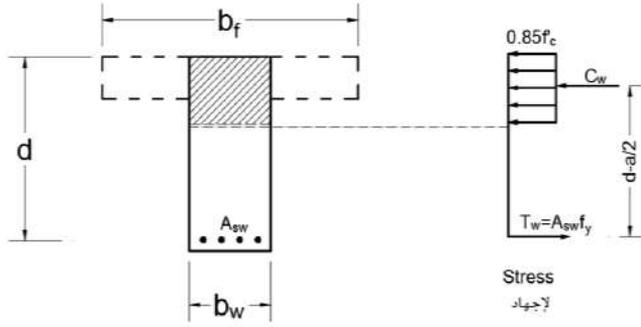
- تسليح الجناح:

بأخذ مجموع العزوم حول قوة الضغط في البيتون C_f :

$$M_{uf} = \Omega A_{sf} f_y (d - t_f / 2)$$

$$A_{sf} = \frac{M_{uf}}{\Omega f_y (d - t_f / 2)} \quad (4-7)$$

ب. دراسة المقطع الثاني:



الشكل (7-12) الإجهادات على الجذع

إنَّ العزم الذي يتحمّله الجذع هو العزم المتبقي:

$$M_{uw} = M_u - M_{uf}$$

- التسليح: إنَّ حسابات التسليح تتبع حسابات مقطع مستطيل عرضه b_w وارتفاعه d :
- يتّم حساب الثابت:

$$A_0 = \frac{M_{uw} / \Omega}{b_w d^2 0.85 f'_c} \quad \alpha = 1 - \sqrt{1 - 2A_0} \quad \gamma = 1 - \frac{\alpha}{2}$$

- المقارنة مع قيمة α_{max} :

$$\alpha < \alpha_{max} = \frac{267.75}{630 + f_y}$$

- يتّم حساب مساحة التسليح: $A_{sw} = \frac{M_{uw} / \Omega}{f_y \gamma d}$

- يكون التسليح الكلي عبارة عن مجموع تسليحي المقطعين: $A_s = A_{yf} + A_{sw}$
- تتّم مقارنة هذا التسليح مع مساحة التسليح الدنيا ومساحة التسليح العظمى من أجل مقطع .T

6-7 مساحة التسليح القصوى من أجل مقطع بشكل T:

تُعطى معادلة موقع المحور المحايد التوازني C_b كما يلي:

$$c_b = \frac{630}{630 + f_y} d \quad a_b = 0.85 \frac{630}{630 + f_y} d$$

لتحديد موقع المحور المحايد التوازني (وهو يختلف بطبيعة الحال عن المحور المحايد في حالة التسليح الحديّة)، تتمُّ المقارنة بين a_b وسماكة الجناح t_f فإذا كانت a_b أقل من سماكة الجناح فإنَّ المحور المحايد التوازني يقع ضمن الجناح. بينما إذا تجاوزتها فيكون المحور المحايد التوازني ضمن الجذع:

$$t_f \geq 0.85 \frac{630}{630 + f_y} d$$

• عندما يكون المحور المحايد التوازني ضمن الجناح $t_f \geq a_b$:

تُحسب مساحة التسليح التوازنية من أجل مقطع مستطيل عرضه b_f وارتفاعه d :

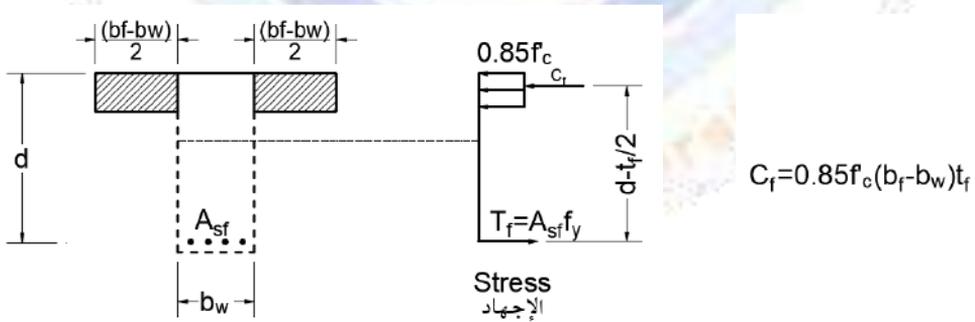
$$A_{sb} = \frac{455}{(630 + f_y)} \frac{f'_c}{f_y} b_f d$$

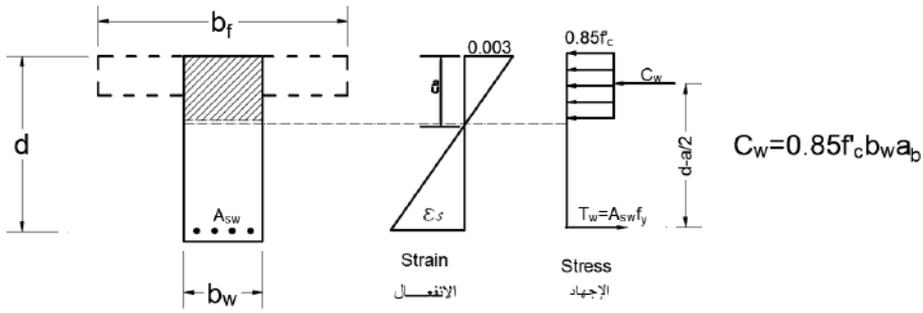
• عندما يكون المحور المحايد التوازني ضمن الجذع $t_f < a_b$:

تُعطى معادلة مساحة التسليح التوازنية في هذه الحالة كما يلي:

$$A_{sb} = \left[\frac{455}{(630 + f_y)} \frac{f'_c}{f_y} + \frac{0.85 f'_c (b_f - b_w) t_f}{b_w d f_y} \right] b_w d$$

يمكن البرهان على هذه المعادلة كما يلي:





الشكل (7-13) الإجهادات على المقطع التوازني

من شرط توازن القوى:

$$T_f + T_w = C_f + C_w$$

$$(A_{sf} + A_{sw})f_y = 0.85f'_c a_b b_w + 0.85f'_c (b_f - b_w) t_f$$

$$A_{sb} f_y = \left[0.85 \frac{630}{630 + f_y} 0.85f'_c + \frac{0.85f'_c (b_f - b_w) t_f}{b_w d} \right] b_w d$$

$$A_{sb} = \left[\frac{455}{(630 + f_y)} \frac{f'_c}{f_y} + \frac{0.85f'_c (b_f - b_w) t_f}{b_w d f_y} \right] b_w d \quad (5-7)$$

7-7 العزم الحدي (العزم المقاوم) الذي يتحمّله مقطع بشكل T معلوم الأبعاد والتسليح:

لإيجاد العزم الحدي الذي يتحمّله المقطع بشكل T يتم اتباع الخطوات الآتية:

• تحديد موقع المحور المحايد:

عندما يكون الجناح مضغوطاً بالكامل يكون:

$$a = t_f$$

$$\frac{\mu_s f_y}{0.85f'_c} d = t_f \Rightarrow \mu_s = \frac{t_f}{d} \frac{0.85f'_c}{f_y}$$

$$\frac{A_s}{b_f d} = \frac{t_f}{d} \frac{0.85f'_c}{f_y}$$

ويكون شرط وقوع المحور المحايد ضمن الجناح:

$$\frac{A_s}{b_f d} \leq \frac{t_f}{d} \frac{0.85f'_c}{f_y} \quad (6-7)$$

- عندما يتحقق الشرط $\frac{A_s}{b_f d} \leq \frac{t_f}{d} \frac{0.85 f'_c}{f_y}$ يكون المحور المحايد ضمن الجناح ويكون العزم المقاوم:

$$M_{ur} = \Omega A_s f_y (d - a/2) \quad (7-7)$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b_f}$$

- عندما لا يتحقق الشرط أي عندما يكون $\frac{A_s}{b_f d} > \frac{t_f}{d} \frac{0.85 f'_c}{f_y}$ يكون المحور المحايد مار بالجذع ويكون العزم المقاوم عبارة عن مجموع عزمين للجناح والجذع.

$$M_{ur} = \Omega [A_{sf} f_y (d - t_f / 2) + A_{sw} f_y (d - a / 2)] \quad (8-7)$$

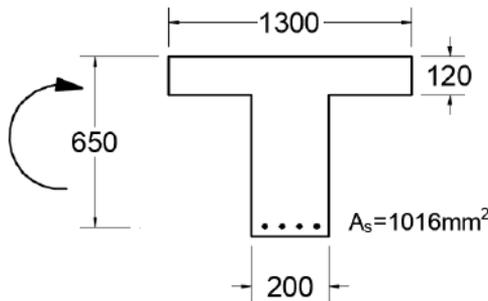
$$a = \frac{A_{sw} f_y}{0.85 f'_c b_w}$$

$$A_{sf} = \frac{(b_f - b_w)}{f_y} 0.85 f'_c t_f$$

$$A_{sw} = A_s - A_{sf}$$

7-8 أمثلة على حساب العزم المقاوم من أجل مقطع بشكل T:

مثال تطبيقي (1-7):



أوجد العزم الذي يتحمّله المقطع المبين بالشكل، ثمّ احسب مساحات التسليح القصوى والدنيا. علماً أن:

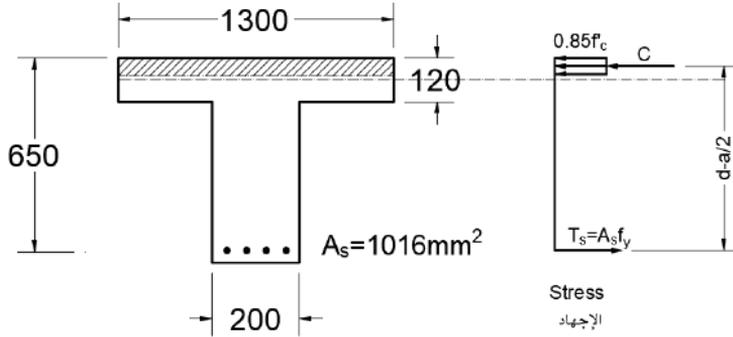
$$f_y = 360 \text{ MPa} \quad f'_c = 20 \text{ MPa} \quad d' = 50 \text{ mm}$$

الحل:

- يتمّ تحديد موقع المحور المحايد:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b_f} = \frac{1016 \times 360}{0.85 \times 20 \times 1300} = 16.55 \text{ mm} < t_f = 120 \text{ mm}$$

والمحور المحايد يقع ضمن الجناح ويكون المقطع مستطيلاً عرضه b_f وارتفاعه الفعال d .



• بأخذ العزم حول قوة الضغط C :

$$M_{ur} = \Omega A_s f_y (d - a/2) = 0.9 \times 1016 \times 360 (650 - 16.55/2)$$

$$= 211.25 \times 10^6 \text{ N.mm} = 211.25 \text{ kN.m}$$

• مساحة التسليح القصوى:

$$a_b = 0.85 \frac{630}{630 + f_y} d = 0.85 \frac{630}{630 + 360} 650 = 351.6 \text{ mm} > t_f$$

$$A_{sb} = \left[\frac{455}{(630 + f_y)} \frac{f'_c}{f_y} + \frac{0.85 f'_c (b_f - b_w) t_f}{b_w d f_y} \right] b_w d$$

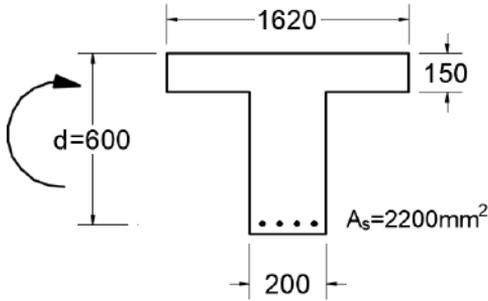
$$= \left[\frac{455}{(630 + 360)} \frac{20}{360} + \frac{0.85 \times 20 (1300 - 200) 120}{200 \times 650 \times 360} \right] 200 \times 650 = 9662.6 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \max} = A_{sb} / 2 = 4776.3 \text{ mm}^2$$

• مساحة التسليح الدنيا:

$$A_{s \min} = \frac{0.9}{f_y} b_w d = 325 \text{ mm}^2$$

مثال تطبيقي (7-2):



أوجد العزم الذي يتحمّله المقطع المبيّن بالشكل، ثمّ احسب مساحات التسليح القصوى والدنيا والعزم الأعظم الذي يتحمّله المقطع المسلح بتسليح أعظم. علماً أنّ:

$$f_y = 420 \text{ MPa} \quad f'_c = 25 \text{ MPa} \quad d' = 50 \text{ mm}$$

الحل:

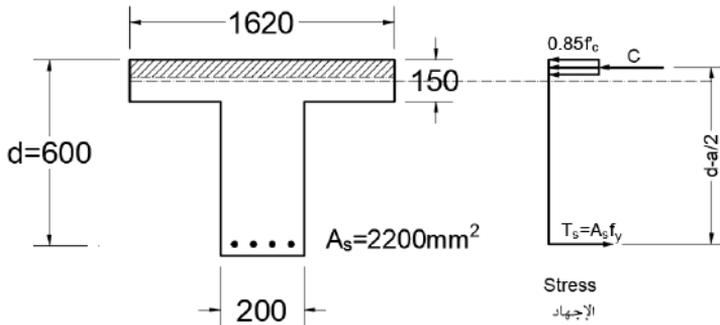
• يتمّ تحديد موقع المحور المحايد:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b_f} = \frac{2020 \times 420}{0.85 \times 25 \times 1650} = 26.35 \text{ mm} < t_f = 150 \text{ mm}$$

والمحور المحايد يقع ضمن الجناح ويكون المقطع مستطيلاً عرضه b_f وارتفاعه الفعال d .

• بأخذ العزم حول قوة الضغط C :

$$M_{ur} = \Omega A_s f_y (d - a/2) = 0.9 \times 2020 \times 420 (600 - 26.35/2) \times 10^{-6} = 488 \text{ kN.m}$$



• مساحة التسليح القصوى:

$$a_b = 0.85 \frac{630}{630 + f_y} d = 0.85 \frac{630}{630 + 420} 600 = 306 \text{ mm} > t_f$$

$$A_{sb} = \left[\frac{455}{(630 + f_y)} \frac{f'_c}{f_y} + \frac{0.85 f'_c (b_f - b_w) t_f}{b_w d f_y} \right] b_w d$$

$$= \left[\frac{455}{(630 + 420)} \frac{25}{420} + \frac{0.85 \times 25 (1650 - 200) 150}{200 \times 600 \times 420} \right] 200 \times 600 = 14099.7 \text{ mm}^2$$

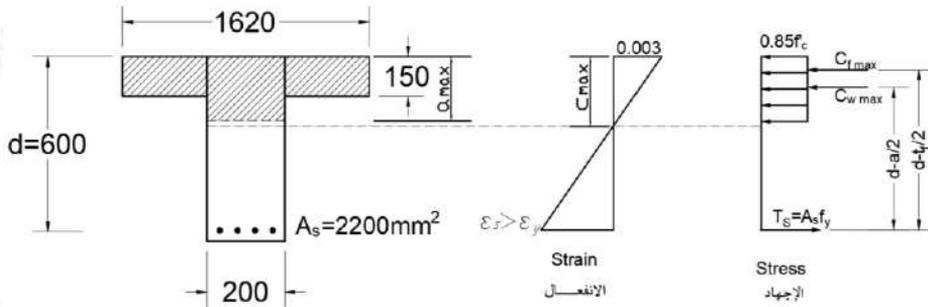
$$A_{s \max} = A_{sb} / 2 = 7049.85 \text{ mm}^2$$

• مساحة التسليح الدنيا:

$$A_{s \min} = \frac{0.9}{f_y} b_w d = 257.14 \text{ mm}^2$$

• العزم الأعظم الموافق لنسبة تسليح عظمى:

$$a_{\max} = \frac{1}{2} a_b = 153 \text{ mm} > t_f$$



بأخذ مجموع العزوم حول قوة الشد في الفولاذ يكون:

$$M_{u \max} = \Omega [C_{f \max} (d - t_f / 2) + C_{w \max} (d - a_{\max} / 2)]$$

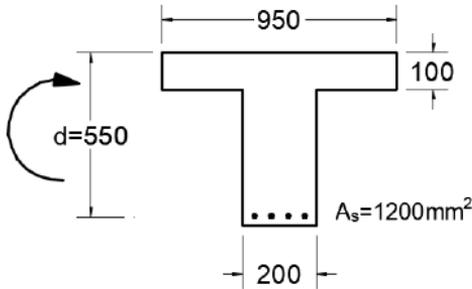
$$C_{f \max} = 0.85 f'_c (b_f - b_w) t_f = 0.85 \times 25 (1650 - 200) 150 = 4621.9 \times 10^3 \text{ N}$$

$$C_{w \max} = 0.85 f'_c b_w a_{\max} = 0.85 \times 25 \times 200 \times 153 = 650.25 \times 10^3 \text{ N}$$

$$M_{u \max} = 0.9 [4621.9 \times 10^3 (600 - 150 / 2) + 650.25 \times 10^3 (600 - 153 / 2)] 10^{-6}$$

$$= 2490.2 \text{ kN.m}$$

مثال تطبيقي (3-7):



تحقق من كون المقطع المبين بالشكل قادر على تحمل العزم الحدي $M_u=170\text{kN.m}$ ، ثم احسب مساحات التسليح القصوى والدنيا والعزم الأعظم الذي يتحمّله المقطع المسلح بتسليح أعظم. علماً بأن:

$$f_y = 300\text{MPa} \quad f'_c = 22\text{MPa} \quad d' = 50\text{mm}$$

- يتمّ تحديد موقع المحور المحايد:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b_f} = \frac{1200 \times 300}{0.85 \times 22 \times 950} = 20.26\text{mm} < t_f = 100\text{mm}$$

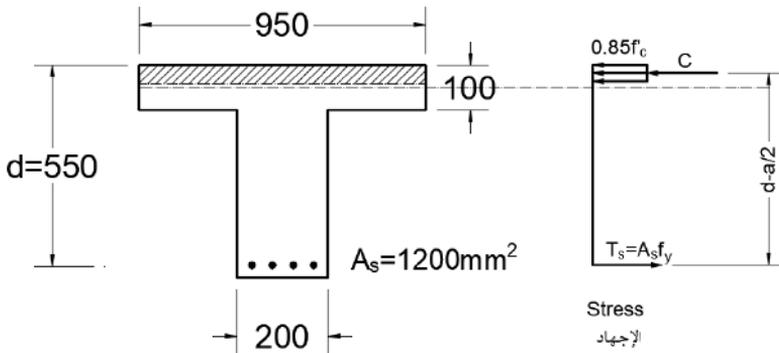
والمحور المحايد يقع ضمن الجناح ويكون المقطع مستطيلاً عرضه b_f وارتفاعه الفعال d .

- بأخذ العزم حول قوة الضغط C:

$$M_{ur} = \Omega A_s f_y (d - a/2) =$$

$$0.9 \times 1200 \times 300 (550 - 20.26/2) \times 10^{-6} = 174.9\text{kN.m} > 170\text{kN.m}$$

والمقطع قادر على تحمل العزم المفروض.



- مساحة التسليح القصوى:

$$a_b = 0.85 \frac{630}{630 + f_y} d = 0.85 \frac{630}{630 + 300} 550 = 316.7\text{mm} > t_f$$

$$A_{sb} = \left[\frac{455}{(630 + f_y)} \frac{f'_c}{f_y} + \frac{0.85 f'_c (b_f - b_w) t_f}{b_w d f_y} \right] b_w d$$

$$= \left[\frac{455}{(630 + 300)} \frac{22}{300} + \frac{0.85 \times 22 (950 - 200) 100}{200 \times 550 \times 300} \right] 200 \times 550 = 8621.6 \text{ mm}^2$$

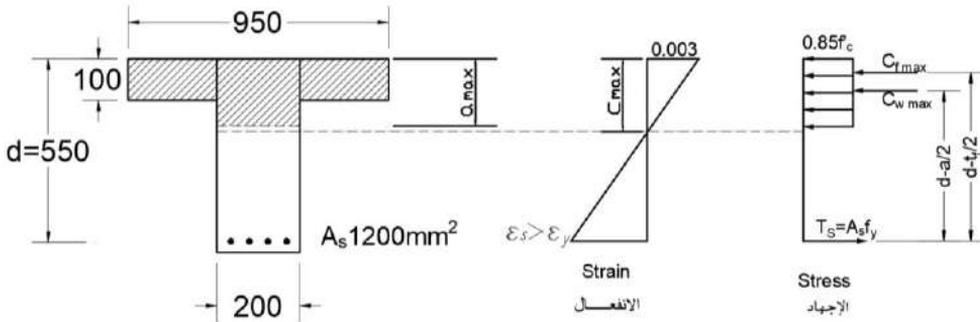
$$A_{s \max} = A_{sb} / 2 = 4310.8 \text{ mm}^2$$

• مساحة التسليح الدنيا:

$$A_{s \min} = \frac{0.9}{f_y} b_w d = 330 \text{ mm}^2$$

• العزم الأعظم الموافق لنسبة تسليح عظمى:

$$a_{\max} = \frac{1}{2} a_b = 158.35 \text{ mm} > t_f$$



بأخذ مجموع العزوم حول قوة الشد في الفولاذ يكون:

$$M_{u \max} = \Omega [C_{f \max} (d - t_f / 2) + C_{w \max} (d - a_{\max} / 2)]$$

$$C_{f \max} = 0.85 f'_c (b_f - b_w) t_f = 0.85 \times 22 (950 - 200) 100 = 1402.5 \times 10^3 \text{ N}$$

$$C_{w \max} = 0.85 f'_c b_w a_{\max} = 0.85 \times 22 \times 200 \times 158.35 = 592.2 \times 10^3 \text{ N}$$

$$M_{u \max} = 0.9 [1402.5 \times 10^3 (550 - 100 / 2) + 592.2 \times 10^3 (550 - 158.35 / 2)] 10^{-6}$$

$$= 882.07 \text{ kN.m}$$

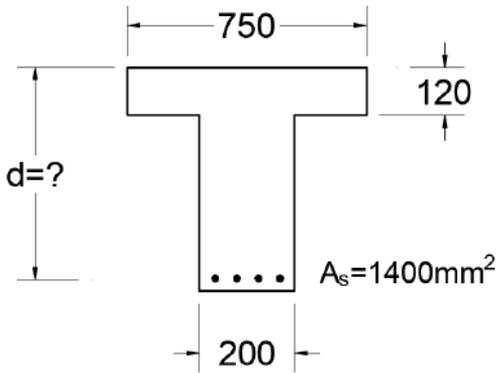
مثال تطبيقي (4-7):

احسب الارتفاع الفعال في المقطع T
المبين بالشكل اللازم لمقاومة العزم الحدي
. $M_u = 250 \text{ kN.m}$

$$f_y = 300 \text{ MPa} \quad f'_c = 20 \text{ MPa}$$

الحل:

- بفرض كون المحور المحايد ضمن الجناح:



$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b_f} = \frac{1400 \times 300}{0.85 \times 20 \times 750} = 32.94 \text{ mm} < t_f = 120 \text{ mm}$$

- بأخذ العزم حول قوة الضغط C:

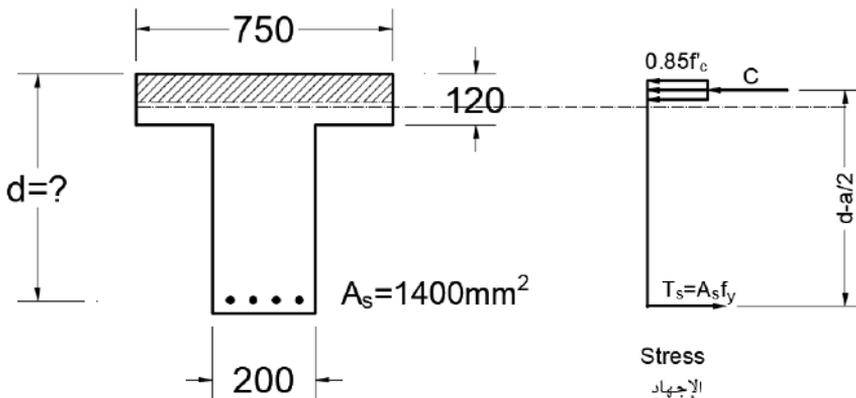
$$M_{ur} = \Omega T_s (d - a/2) = 250 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

$$T_s = A_s f_y = 1400 \times 300 = 420000 \text{ N}$$

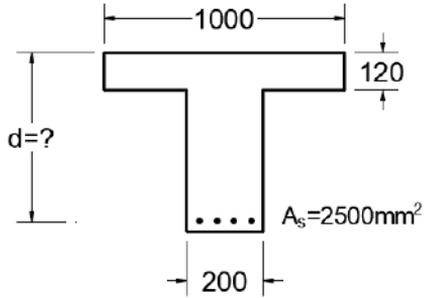
$$0.9 \times 420000 (d - 32.94/2) = 250 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

$$d = \frac{250 \times 10^6}{0.9 \times 420000} + 32.94/2 = 677.84 \text{ mm}$$

يتم اعتبار $d = 700 \text{ mm}$



مثال تطبيقي (5-7):



احسب الارتفاع الفعال في المقطع T المبين

بالشكل اللازم لمقاومة العزم الحدي $M_u = 500 \text{ kN.m}$.

$$f_y = 360 \text{ MPa} \quad f'_c = 18 \text{ MPa}$$

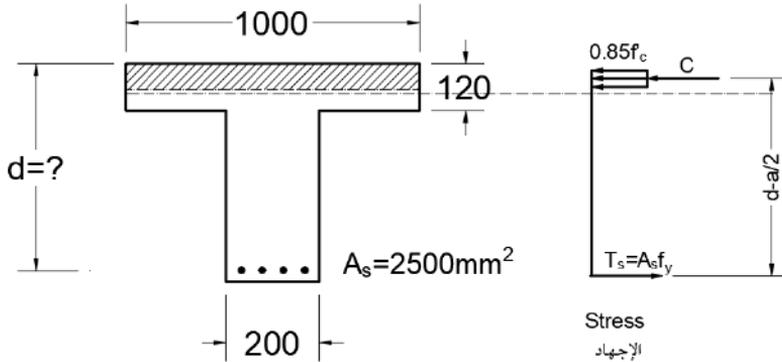
الحل:

- بفرض كون المحور المحايد ضمن الجناح:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b_f} = \frac{2500 \times 360}{0.85 \times 18 \times 1000} = 58.82 \text{ mm} < t_f = 120 \text{ mm}$$

- بأخذ العزم حول قوة الضغط C:

$$M_u = \Omega T_s (d - a/2) = 500 \times 10^6 \text{ N.mm}$$



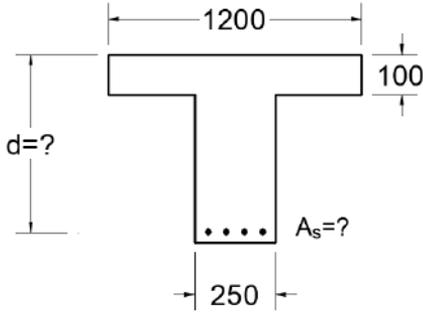
$$T_s = A_s f_y = 2500 \times 360 = 900000 \text{ N}$$

$$0.9 \times T_s (d - a/2) = M_u \Rightarrow d = \frac{M_u}{0.9 \times T_s} + a/2$$

$$d = \frac{500 \times 10^6}{0.9 \times 900000} + 58.82/2 = 646.7 \text{ mm}$$

يتم اعتبار $d = 650 \text{ mm}$.

مثال تطبيقي (6-7):



احسب الارتفاع الفعال ومساحة التسليح في المقطع T المبين بالشكل اللازم لمقاومة العزم الحدي $M_u = 300 \text{ kN.m}$.

$$f_y = 360 \text{ MPa} \quad f'_c = 20 \text{ MPa}$$

الحل:

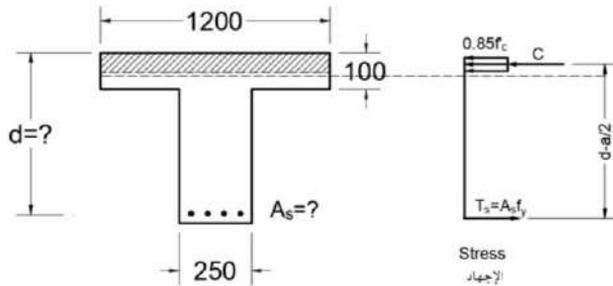
بفرض كون المحور المحايد ضمن الجناح. يوجد مجهولان

في هذه المسألة وبالتالي يجب فرض أحدها. بفرض نسبة التسليح تساوي 0.2%:

$$\mu_s = 0.002 \Rightarrow A_s = 0.002 b_f d = 2.4d$$

وتكون قيمة a بدلالة d:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b_f} = \frac{2.4d \times 360}{0.85 \times 20 \times 1200} = 0.0424d$$



• بأخذ العزم حول قوة الضغط C:

$$M_u = \Omega T_s (d - a/2) = 300 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

$$T_s = A_s f_y = 2.4d \times 360 = 864d$$

$$0.9 \times 864d (d - 0.0424d/2) = 300 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

$$761.11d^2 = 300 \times 10^6 \text{ N.mm} \Rightarrow d = 627.82 \text{ mm}$$

بفرض $d = 650 \text{ mm}$:

$$a = 0.0424d = 27.56 \text{ mm} < t_f = 100 \text{ mm}$$

$$A_s = 2.4d = 2.4 \times 650 = 1560 \text{ mm}^2$$

- التحقق من مساحة التسليح: مساحة التسليح القصوى:

$$a_b = 0.85 \frac{630}{630 + f_y} d = 0.85 \frac{630}{630 + 360} 650 = 351.6 \text{ mm} > t_f$$

$$A_{sb} = \left[\frac{455}{(630 + f_y)} \frac{f'_c}{f_y} + \frac{0.85 f'_c (b_f - b_w) t_f}{b_w d f_y} \right] b_w d$$

$$= \left[\frac{455}{(630 + 360)} \frac{20}{360} + \frac{0.85 \times 20 (1200 - 250) 100}{250 \times 650 \times 360} \right] 250 \times 650 = 8635 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \max} = A_{sb} / 2 = 4317.6 \text{ mm}^2 > A_s = 1560 \text{ mm}^2$$

- مساحة التسليح الدنيا:

$$A_{s \min} = \frac{0.9}{f_y} b_w d = 406.25 \text{ mm}^2 < A_s = 1560 \text{ mm}^2$$

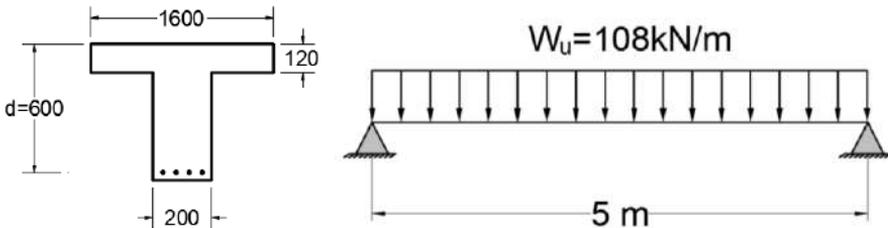
7-9 أمثلة على تصميم المقاطع بشكل T المعرضة إلى عزم انعطاف بسيط:

مثال تطبيقي (7-7):

أوجد التسليح في المقطع المبين بالشكل من أجل مقاومة العزم الأعظم الحاصل في الجائر

البسيط المبين:

$$f_y = 360 \text{ MPa} \quad f'_c = 20 \text{ MPa}$$



الحل:

- إنَّ قيمة العزم الأعظم الحاصل في الجائر المبين بالشكل تساوي إلى:

$$M_u = \frac{W_u L^2}{8} = \frac{108 \times 5^2}{8} = 337.5 \text{ kN.m}$$

وهو عزم موجب أي يشد الألياف السفلية ومنطقة الضغط بشكل T:

- العزم الذي يتحمّله الجناح:

$$M_{d0} = \Omega 0.85 f'_c b_f t_f (d - t_f / 2) = 0.9 \times 0.85 \times 20 \times 1600 \times 120 (600 - 120 / 2) 10^{-6}$$

$$= 1586.3 \text{ kN.m} > M_u$$

والمقطع يعمل بشكل مستطيل عرضه bf وارتفاعه الفعال d.

• يتّم حساب الثوابت:

$$A_0 = \frac{M_u / \Omega}{b_f d^2 0.85 f'_c} = \frac{337.5 \times 10^6 / 0.9}{1600 \times 600^2 \times 0.85 \times 20} = 0.0383$$

$$\alpha = 1 - \sqrt{1 - 2A_0} = 1 - \sqrt{1 - 2 \times 0.0383} = 0.0391$$

$$\gamma = 1 - \frac{\alpha}{2} = 1 - \frac{0.0391}{2} = 0.98$$

• المقارنة مع قيمة α_{\max} :

$$\alpha < \alpha_{\max} = \frac{267.75}{630 + f_y} = 0.27$$

• يتّم حساب مساحة التسليح:

$$A_s = \frac{M_u / \Omega}{\gamma d f_y} = \frac{337.5 \times 10^6 / 0.9}{0.98 \times 600 \times 360} = 1770.7 \text{ mm}^2$$

• المقارنة مع مساحة التسليح الدنيا:

$$A_{s \min} = \frac{0.9}{f_y} b_w d = 300 \text{ mm}^2$$

• المقارنة مع مساحة التسليح القصوى:

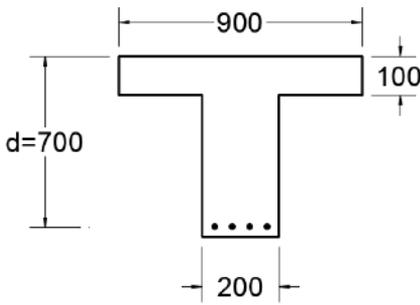
$$a_b = 0.85 \frac{630}{630 + f_y} d = 0.85 \frac{630}{630 + 360} 600 = 324.5 \text{ mm} > t_f = 120 \text{ mm}$$

$$A_{sb} = \left[\frac{455}{(630 + f_y)} \frac{f'_c}{f_y} + \frac{0.85 f'_c (b_f - b_w) t_f}{b_w d f_y} \right] b_w d$$

$$= \left[\frac{455}{(630 + 360)} \frac{20}{360} + \frac{0.85 \times 20 (1600 - 200) 120}{200 \times 600 \times 360} \right] 200 \times 600 = 10997.3 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \max} = A_{sb} / 2 = 5498.7 \text{ mm}^2 > A_s = 1770.7 \text{ mm}^2$$

مثال تطبيقي (7-8):



أوجد التسليح في المقطع المبين بالشكل من

أجل مقاومة عزم حدّي موجب قدره $M_u = 500 \text{ kN.m}$

في الجائز البسيط المبين:

$$f_y = 360 \text{ MPa} \quad f'_c = 25 \text{ MPa}$$

الحل:

• العزم الذي يتحمّله الجناح:

$$M_{d0} = \Omega 0.85 f'_c b_f t_f (d - t_f / 2) = 0.9 \times 0.85 \times 25 \times 900 \times 120 (700 - 100 / 2) 10^{-6}$$

$$= 1118.8 \text{ kN.m} > M_u$$

والمقطع يعمل بشكل مستطيل عرضه b_f وارتفاعه الفعال d .

• يتمّ حساب الثوابت:

$$A_0 = \frac{M_u / \Omega}{b_f d^2 0.85 f'_c} = \frac{500 \times 10^6 / 0.9}{900 \times 700^2 \times 0.85 \times 25} = 0.0593$$

$$\alpha = 1 - \sqrt{1 - 2A_0} = 1 - \sqrt{1 - 2 \times 0.0593} = 0.0612$$

$$\gamma = 1 - \frac{\alpha}{2} = 1 - \frac{0.0612}{2} = 0.969$$

• المقارنة مع قيمة α_{\max} :

$$\alpha < \alpha_{\max} = \frac{267.75}{630 + f_y} = 0.27$$

• يتمّ حساب مساحة التسليح:

$$A_s = \frac{M_u / \Omega}{\gamma d f_y} = \frac{500 \times 10^6 / 0.9}{0.969 \times 700 \times 360} = 2274 \text{ mm}^2$$

• المقارنة مع مساحة التسليح الدنيا:

$$A_{s \min} = \frac{0.9}{f_y} b_w d = 350 \text{ mm}^2$$

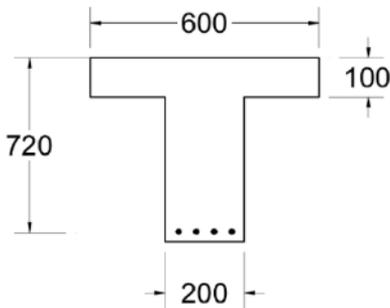
• المقارنة مع مساحة التسليح القصوى:

$$a_b = 0.85 \frac{630}{630 + f_y} d = 0.85 \frac{630}{630 + 360} 700 = 378.64 \text{mm} > t_f = 120 \text{mm}$$

$$A_{sb} = \left[\frac{455}{(630 + f_y)} \frac{f'_c}{f_y} + \frac{0.85 f'_c (b_f - b_w) t_f}{b_w d f_y} \right] b_w d$$

$$= \left[\frac{455}{(630 + 360)} \frac{25}{360} + \frac{0.85 \times 25 (900 - 200) 100}{200 \times 700 \times 360} \right] 200 \times 700 = 8600.24 \text{mm}^2$$

$$A_{s \max} = A_{sb} / 2 = 4300.11 \text{mm}^2 > A_s = 2274.12 \text{mm}^2$$



مثال تطبيقي (9-7):

أوجد التسليح في المقطع المبين بالشكل من أجل مقاومة عزم
حدي موجب قدره $M_u = 650 \text{kN.m}$ في الجانز البسيط المبين:

$$f_y = 280 \text{MPa} \quad f'_c = 20 \text{MPa}$$

الحل:

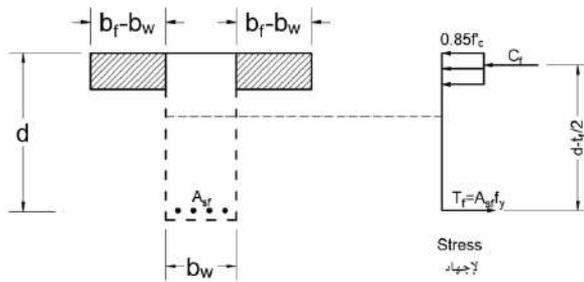
• العزم الذي يتحمّله الجناح:

$$M_{d0} = \Omega 0.85 f'_c b_f t_f (d - t_f / 2) = 0.9 \times 0.85 \times 20 \times 600 \times 100 (720 - 100 / 2) 10^{-6}$$

$$= 615.06 \text{kN.m} < M_u$$

والمقطع يعمل بشكل مقطع T، تتم دراسة كل من الجناح والجذع:

أ. دراسة المقطع الأول:



- يتم حساب العزم الذي يتحمله بيتون الأجنحة وذلك بأخذ مجموع العزوم حول القوة T_s في الفولاذ.

$$M_{uf} = \Omega 0.85 f'_c t_f (b_f - b_w) (d - t_f / 2) =$$

$$0.9 \times 0.85 \times 20 \times 100 (600 - 200) (720 - 100 / 2) 10^{-6} = 410 kN.m$$

- تسليح الجناح:

بأخذ مجموع العزوم حول قوة الضغط في البيتون C_f :

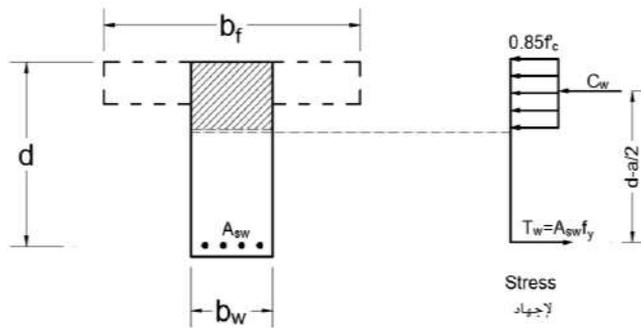
$$M_{uf} = \Omega A_{sf} f_y (d - t_f / 2)$$

$$A_{sf} = \frac{M_{uf}}{\Omega f_y (d - t_f / 2)} = \frac{410 \times 10^{-6}}{0.9 \times 280 (720 - 100 / 2)} = 2428.6 mm^2$$

ب. دراسة المقطع الثاني:

- إن العزم الذي يتحمله الجذع هو العزم المتبقي:

$$M_{uw} = M_u - M_{uf} = 239.96 kN.m$$



- التسليح: إن حسابات التسليح تتبع حسابات مقطع مستطيل عرضه b_w وارتفاعه d :
- يتم حساب الثوابت:

$$A_0 = \frac{M_{uw} / \Omega}{b_w d^2 0.85 f'_c} = \frac{239.96 \times 10^6 / 0.9}{200 \times 720^2 0.85 \times 20} = 0.151$$

$$\alpha = 1 - \sqrt{1 - 2A_0} = 0.165$$

$$\gamma = 1 - \frac{\alpha}{2} = 0.918$$

- المقارنة مع قيمة α_{max} :

$$\alpha < \alpha_{\max} = \frac{267.75}{630 + f_y} = 0.294$$

• يتّم حساب مساحة التسليح:

$$A_{sw} = \frac{M_{uw} / \Omega}{\gamma d f_y} = \frac{293.96 \times 10^6 / 0.9}{0.918 \times 720 \times 280} = 1441.34 \text{ mm}^2$$

• يكون التسليح الكلي عبارة عن مجموع تسليحي المقطعين:

$$A_s = A_{sf} + A_{sw} = 3869.91 \text{ mm}^2$$

• المقارنة مع مساحة التسليح الدنيا:

$$A_{s\min} = \frac{0.9}{f_y} b_w d = 462.86 \text{ mm}^2$$

• المقارنة مع مساحة التسليح القصوى:

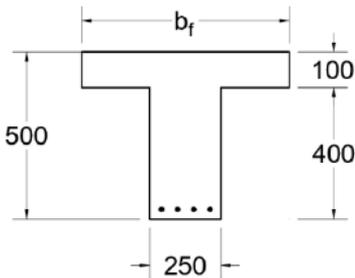
$$a_b = 0.85 \frac{630}{630 + f_y} d = 0.85 \frac{630}{630 + 280} 720 = 423.7 \text{ mm} > t_f = 100 \text{ mm}$$

$$A_{sb} = \left[\frac{455}{(630 + f_y)} \frac{f'_c}{f_y} + \frac{0.85 f'_c (b_f - b_w) t_f}{b_w d f_y} \right] b_w d$$

$$= \left[\frac{455}{(630 + 280)} \frac{20}{280} + \frac{0.85 \times 20 (600 - 200) 100}{200 \times 720 \times 280} \right] 200 \times 720 = 8178.6 \text{ mm}^2$$

$$A_{s\max} = A_{sb} / 2 = 4089.28 \text{ mm}^2 > A_s = 3869.9 \text{ mm}^2$$

مثال تطبيقي (7-10):



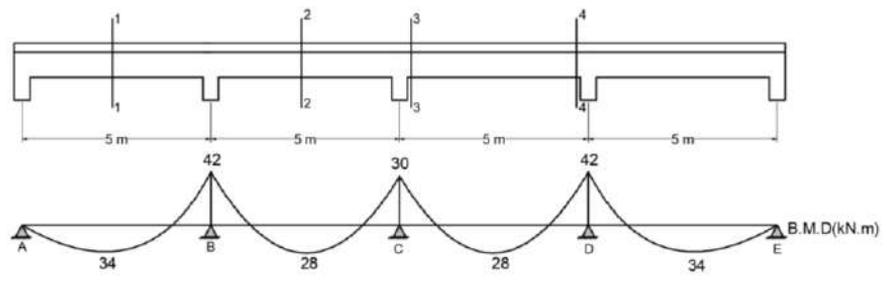
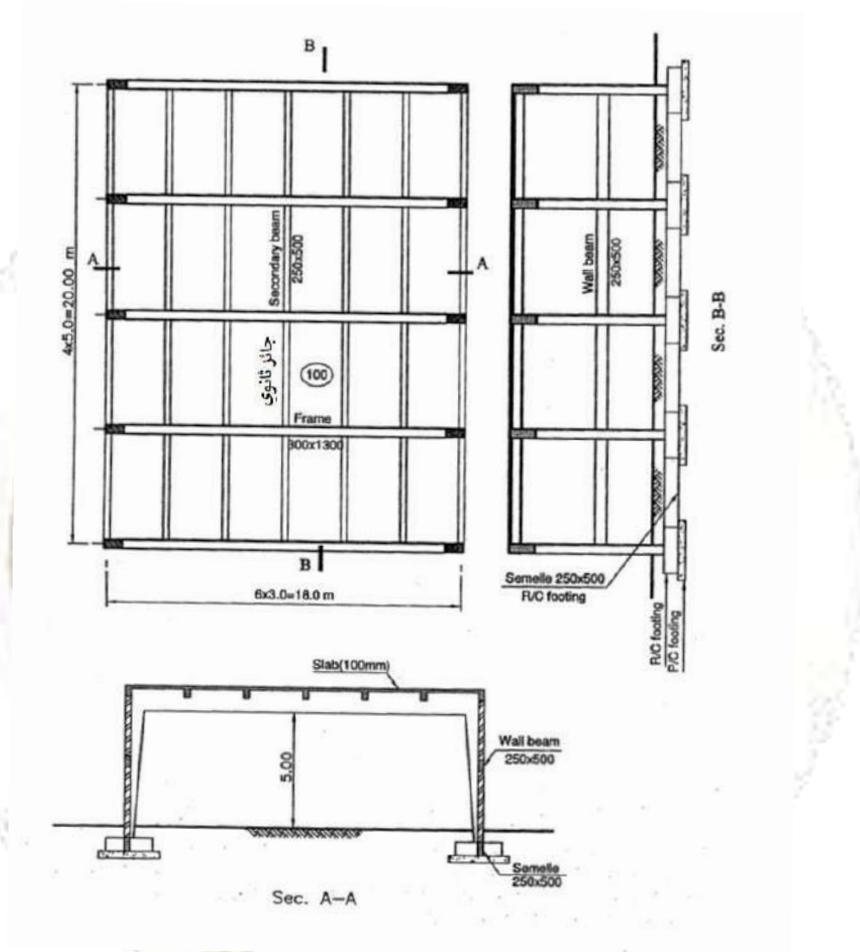
يبين الشكل مسقطاً أفقياً ومقاطع شاقولية في صالة صناعية. المطلوب تصميم الجانز الثانوي وفقاً للمقطع المبين بالشكل بأبعاد ملمترية، علماً أنه يخضع إلى مخطط عزم الانعطاف المبين:

1- حساب عرض الجناح الفعال في كل من المجازات الثلاثة.

2- تصميم المقاطع 1-1, 2-2 لمقاومة العزم الموجب الأعظم.

3- تصميم المقاطع 3-3, 4-4 لمقاومة العزم السالب.

$$f_y = 300MPa \quad f'_c = 20MPa$$



الحل:

1- إيجاد عرض الجناح الفعال:

• في المجاز AB,DE: باعتبار الحملات موزعة:

$$b_f = \min \begin{cases} L_e / 4 = L_e / 4 = 0.87 \times 5000 / 4 = 1087.5 \text{mm} \\ 12t_f + b_w = 12 \times 100 + 250 = 1450 \text{mm} \\ D = 3000 \text{mm} \end{cases} \quad b_f = 1080 \text{mm}$$

• في المجاز BC,CD: باعتبار الحملات موزعة:

$$b_f = \min \begin{cases} L_e / 4 = L_e / 4 = 0.76 \times 5000 / 4 = 950 \text{mm} \\ 12t_f + b_w = 12 \times 100 + 250 = 1450 \text{mm} \\ D = 3000 \text{mm} \end{cases} \quad b_f = 950 \text{mm}$$

2- تصميم الجائز على العزوم الموجبة:

• العزم الموجب الأعظم عند المقطع 1-1 في المجاز AB:

$$.M_u = 34 \text{kN.m}$$

• بفرض سماكة التغطية $d' = 50 \text{mm}$ تكون $d = 450 \text{mm}$.

• العزم الذي يتحمله الجناح:

$$M_{d0} = \Omega 0.85 f'_c b_f t_f (d - t_f / 2)$$

$$= 0.9 \times 0.85 \times 20 \times 1080 \times 100 (450 - 100 / 2) 10^{-6} = 660.96 \text{kN.m} > M_u$$

والمقطع يعمل بشكل مستطيل عرضه b_f وارتفاعه الفعال d .

• يتم حساب الثوابت:

$$A_0 = \frac{M_u / \Omega}{b_f d^2 0.85 f'_c} = \frac{34 \times 10^6 / 0.9}{1080 \times 450^2 \times 0.85 \times 20} = 0.01016$$

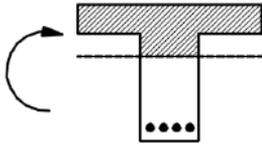
$$\alpha = 1 - \sqrt{1 - 2A_0} = 1 - \sqrt{1 - 2 \times 0.01016} = 0.0102$$

$$\gamma = 1 - \frac{\alpha}{2} = 1 - \frac{0.0102}{2} = 0.995$$

• المقارنة مع قيمة α_{\max} :

$$\alpha < \alpha_{\max} = \frac{267.75}{630 + f_y} = 0.287$$

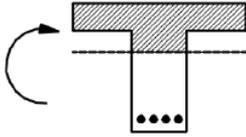
• يتم حساب مساحة التسليح:



$$A_s = \frac{M_u / \Omega}{\gamma d f_y} = \frac{34 \times 10^6 / 0.9}{0.995 \times 450 \times 300} = 281.27 \text{mm}^2$$

- المقارنة مع مساحة التسليح الدنيا:

$$A_{s \min} = \frac{0.9}{f_y} b_w d = 337.5 \text{mm}^2$$



ومساحة التسليح أقل من مساحة التسليح الدنيا وبالتالي يتم اعتماد مساحة التسليح الدنيا.

- العزم الموجب الأعظم عند المقطع 2-2 في المجاز BC:
 $M_u = 28 \text{kN.m}$

- العزم الذي يتحمّله الجناح:

$$M_{d0} = \Omega 0.85 f'_c b_f t_f (d - t_f / 2)$$

$$= 0.9 \times 0.85 \times 20 \times 950 \times 100 (450 - 100 / 2) 10^{-6} = 581.4 \text{kN.m} > M_u$$

والمقطع يعمل بشكل مستطيل عرضه bf وارتفاعه الفعال d.

- يتم حساب الثابت:

$$A_0 = \frac{M_u / \Omega}{b_f d^2 0.85 f'_c} = \frac{28 \times 10^6 / 0.9}{950 \times 450^2 \times 0.85 \times 20} = 0.0095$$

$$\alpha = 1 - \sqrt{1 - 2A_0} = 1 - \sqrt{1 - 2 \times 0.0095} = 0.00956 < a_{\max}$$

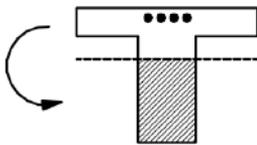
$$\gamma = 1 - \frac{\alpha}{2} = 1 - \frac{0.00956}{2} = 0.995$$

- يتم حساب مساحة التسليح:

$$A_s = \frac{M_u / \Omega}{\gamma d f_y} = \frac{28 \times 10^6 / 0.9}{0.995 \times 450 \times 300} = 231.56 \text{mm}^2 < A_{\min}$$

ومساحة التسليح أقل من مساحة التسليح الدنيا وبالتالي يتم اعتماد مساحة التسليح الدنيا.

- 3- تصميم الجائز على العزوم السالبة:



- العزم السالب الأعظم عند المقطع 3-3 عند المسند B:
 $M_u = 42 \text{kN.m}$

- المقطع يعمل بشكل مستطيل عرضه b_w وارتفاعه الفعال

d.

- يتم حساب الثوابت:

$$A_0 = \frac{M_u / \Omega}{b_w d^2 0.85 f'_c} = \frac{42 \times 10^6 / 0.9}{200 \times 450^2 \times 0.85 \times 20} = 0.0542$$

$$\alpha = 1 - \sqrt{1 - 2A_0} = 1 - \sqrt{1 - 2(0.0542)} = 0.0558 < \alpha_{\max}$$

$$\gamma = 1 - \frac{\alpha}{2} = 1 - \frac{0.0558}{2} = 0.972$$

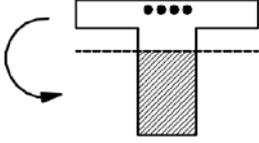
- يتم حساب مساحة التسليح:

$$A_s = \frac{M_u / \Omega}{f_y \gamma d} = \frac{42 \times 10^6 / 0.9}{300 \times 0.972 \times 450} = 355.6 \text{ mm}^2 > A_{s \min}$$

- مساحة التسليح القصوى من أجل مقطع مستطيل عرضه b_w :

$$A_{s \max} = \frac{1}{2} \frac{455}{(630 + f_y)} \frac{f'_c}{f_y} b_w d = \frac{1}{2} \frac{455}{(630 + 300)} \frac{20}{300} 250 \times 450 = 1834.7 \text{ mm}^2$$

- العزم السالب الأعظم عند المقطع 4-4 عند المسند C:



$$.M_u = 30 \text{ kN.m}$$

- المقطع يعمل بشكل مستطيل عرضه b_w وارتفاعه الفعال

.d

- يتم حساب الثوابت:

$$A_0 = \frac{M_u / \Omega}{b_w d^2 0.85 f'_c} = \frac{30 \times 10^6 / 0.9}{200 \times 450^2 \times 0.85 \times 20} = 0.0387$$

$$\alpha = 1 - \sqrt{1 - 2A_0} = 1 - \sqrt{1 - 2(0.0387)} = 0.0395 < \alpha_{\max}$$

$$\gamma = 1 - \frac{\alpha}{2} = 1 - \frac{0.0395}{2} = 0.98$$

- يتم حساب مساحة التسليح:

$$A_s = \frac{M_u / \Omega}{f_y \gamma d} = \frac{30 \times 10^6 / 0.9}{300 \times 0.98 \times 450} = 251.89 \text{ mm}^2 < A_{s \min}$$

الفصل الثامن

طريقة حدود الاستثمار في تصميم مقاطع البيتون المسلح

Serviceability Limit State Method for Designing R/C Sections

1-8 مقدمة:

تُسمى أيضاً الطريقة المرنة، ذلك لأنَّ المعيار الأول لتأمين سلامة العناصر الإنشائية المصممة حسب الطريقة المرنة هو أن تكون الإجهادات الأعظمية في كل من البيتون والفولاذ ضمن حدود قصوى مسموح بها تُدعى الإجهادات المسموحة. إنَّ إجهادات الاستثمار المسموحة تأخذ بالاعتبار عامل أمان يشمل عدم انطباق الواقع الفعلي مع الفرضيات المعتمدة سابقاً لتسهيل الحسابات، وكذلك الاحتمالات غير المتوقعة لزيادة الحمولات على المنشأ بسبب ظروف طارئة لا يمكن ضبطها، وعدم التجانس في البيتون وعدم الدقة في التنفيذ وكذلك احتمال وجود عيوب في فولاذ التسليح.

إنَّ استخدامات الطريقة المرنة تقتصر على بعض المنشآت الخاصة بسبب كونها غير اقتصادية حيث تطبق على المقاطع المعرضة لضغط السوائل التي يكون فيها احتمالات أضرار لتآكل فولاذ التسليح. والمقاطع المعرضة إلى أحمال ديناميكية متكررة مما يؤدي إلى حدوث ظاهرة التعب في فولاذ التسليح. أيضاً تطبق في المنشآت التي تتطلب الكودات الخاصة بها شرطاً صريحاً لتحقيق الإجهادات مثل المداخل والعناصر من البيتون مسبق الإجهاد.

2-8 الالتحام بين الفولاذ والبيتون:

يجب أن يكون الالتحام محققاً بين البيتون والفولاذ حيث تبنى نظرية البيتون المسلح على هذه الفرضية. إنَّ تحقق الالتحام يعني أن التغيرات النسبية في كل من البيتون والفولاذ متساوية عند الالتحام في حالتي الشد والضغط $\epsilon_c = \epsilon_s$. حسب قانون هوك:

$$\epsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_c} \quad \epsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (1-8)$$

ومنه تكون الإجهادات في الفولاذ بدلالة الإجهادات في البيتون كما يلي:

$$\sigma_s = \frac{E_s}{E_c} \sigma_c = n \sigma_c$$

حيث n أمثال التكافؤ:

$$n = \frac{E_s}{E_c} \quad (2-8)$$

بالاعتماد على هذه المعادلة يُمكن تحويل المقاطع الفولاذية إلى مقاطع بيتونية أو العكس؛ أي إنَّ وحدة مقطع التسليح تكافئ n مرة وحدة مقطع البيتون.

8-2-1 قيمة العامل n :

تسمّى أمثال التعادل أو أمثال التكافؤ ويقترح الكود العربي السوري اعتبار القيمة $n=15$ في العناصر الإنشائية الخاضعة إلى الانعطاف البسيط - حالة حد تجاوز الإجهادات المسموحة، والقيمة $n=10$ في العناصر التي لا يُسمح فيها بوجود تشققات - حالة حد التشقق المعيب كما في المنشآت المعرضة للماء كالخزانات. بينما في حالة حد التشكل فيجب حسابها بدقة وفق العلاقة أعلاه.

في الحقيقة إنَّ قيمة العامل n غير ثابتة، وقد دلّت التجارب على أنَّ عامل المرونة الطولاني في البيتون E_c يتغيّر حسب نوع البيتون وتركيبه وهذا يؤدي إلى اختلاف قيمة n وعدم ثباتها، ولكن للتبسيط يُمكن اعتماد القيم المذكورة أعلاه.

8-3 فرضيات الطريقة:

أ. يستند التحليل الخطّي المرن في تحقيق سلامة المقاطع الخاضعة لأفعال الاستثمار إلى الفرض بأنَّ الإجهادات الفعلية في المقاطع الحرجة في كل من البيتون والفولاذ لا تزيد على إجهادات الاستثمار المسموحة.

ب. المقاطع المستوية قبل الانعطاف تظل مستوية بعده، أي إنَّ الانفعال في كل من الفولاذ والبيتون يتناسب مع البعد عن المحور المحايد.

ت. يسلك الفولاذ والبيتون سلوك المواد المرنة ضمن حدود أحمال الاستثمار، وبذلك يكون توزع الإجهادات خطّيّاً.

ث. يتمُّ تحليل وتصميم المقاطع بإهمال قدرة البيتون على الشد بفرض وجود تشققات ضمنه ويتحمّل الفولاذ كل إجهادات الشد في المقطع.

4-8 الإجهادات المسموحة في حالة التعرض إلى الانعطاف البسيط:

- الإجهادات المسموحة في فولاذ التسليح:

○ إجهادات الشد: إنَّ إجهادات الشد المسموح بها في فولاذ التسليح تساوي إلى:

$$\bar{\sigma}_s = 0.55f_y$$

○ إجهادات الضغط: إنَّ إجهادات الضغط المسموح بها في فولاذ التسليح في العناصر

المعرضة إلى الانعطاف البسيط تساوي إلى إجهاد الضغط في البيتون المجاور

لهذا التسليح مضروباً بعامل التكافؤ n على ألا تزيد هذه القيمة على

$$\bar{\sigma}_s = 0.55f_y$$

- الإجهادات المسموحة في البيتون:

○ لا يزيد إجهاد الضغط في المقاطع المستطيلة على $\bar{\sigma}'_c = 0.55f'_c$ وعملياً، ويتمُّ

استخدام القيمة $\bar{\sigma}'_c = 0.45f'_c$.

○ لا يزيد إجهاد الضغط في المقاطع بشكل T التي لا يقل سمك الجناح فيها عن

0.4 الارتفاع الفعال على $\bar{\sigma}'_c = 0.55f'_c$.

○ لا يزيد إجهاد الضغط في المقاطع بشكل T التي لا يتجاوز فيها عرض الجناح

من كل جهة مرتين سمك الجناح على $\bar{\sigma}'_c = 0.5f'_c$.

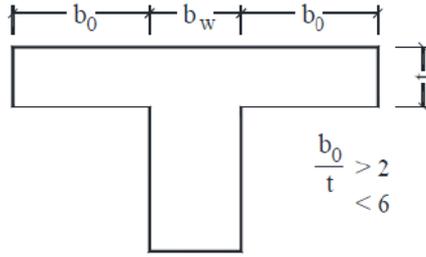
○ لا يزيد إجهاد الضغط في المقاطع بشكل T التي يتجاوز فيها عرض الجناح من

كل جهة مرتين سمك الجناح ولا يتجاوز 6 مرات سمك الجناح على

$\bar{\sigma}'_c = 0.5f'_c$ تؤخذ قيمة الإجهاد المسموح من الجدول (1-8).

- الجدول (1-8) الإجهاد المسموح في البيتون في المقاطع بشكل T

6	5	4	3	2	b_0 / t_f
$\bar{\sigma}'_c = 0.3f'_c$	$\bar{\sigma}'_c = 0.35f'_c$	$\bar{\sigma}'_c = 0.4f'_c$	$\bar{\sigma}'_c = 0.45f'_c$	$\bar{\sigma}'_c = 0.5f'_c$	الإجهاد المسموح



الشكل (1-8) عرض الجناحين في الجائز مقطع T

ملاحظة(1):

في حال كون سماكة الجناح t_f نقل عن عُشر الارتفاع الفعال للمقطع d أو كانت سماكة البلاطة أقل من 60mm عندئذ يتم إهمال مشاركة الجناح ويُدرس المقطع كمستطيل.

ملاحظة/2:

ينوه عند حساب المقاطع المجنحة بآلا يقل العزم المقاوم لها عن العزم المقاوم للمقطع المستطيل بإهمال الجناح، وبافتراض الإجهاد المسموح يساوي إلى القيمة غير المخفّضة $\bar{\sigma}'_c = 0.55f'_c$.

ملاحظة/3:

ينوه بأن الحدود المعطاة أعلاه للإجهادات المسموحة تمثل حدوداً عليا واختيار الأبعاد بناءً عليها يُعطي أبعاداً غير اقتصادية ومزحمة بالتسليح. لذلك يُفضل في الحالات غير الاضطرارية ألا يزيد إجهاد الضغط في الببتون على $\bar{\sigma}'_c = 0.45f'_c$.

5-8 تصميم المقاطع المستطيلة أحادية التسليح الخاضعة إلى الانعطاف البسيط:

إنّ توزيع الإجهادات على المقطع في طريقة حدود الاستثمار يكون خطياً كما في الشكل حيث إن الإجهادات المسموحة هي ضمن الحدود المرنة بهامش أمان مناسب كما ورد سابقاً. بفرض كون المقطع خاضع إلى عزم موجب وكون الإجهادات المسموحة $\bar{\sigma}'_c$.

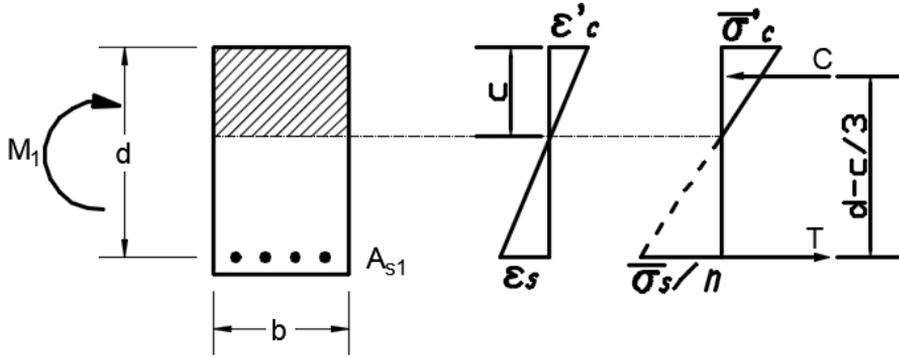
- تعيين موقع المحور المحايد C:

من التشابه في مخطط الإجهاد يكون:

$$\frac{\bar{\sigma}'_c}{c} = \frac{\bar{\sigma}_s/n}{d-c} \Rightarrow \frac{d-c}{c} = \frac{\bar{\sigma}_s/n}{\bar{\sigma}'_c}$$

$$n\bar{\sigma}'_c(d-c) = \bar{\sigma}_s c \Rightarrow n\bar{\sigma}'_c d - n\bar{\sigma}'_c c = \bar{\sigma}_s c$$

$$\bar{\sigma}_s c + n\bar{\sigma}'_c c = n\bar{\sigma}'_c d \Rightarrow c(\bar{\sigma}_s + n\bar{\sigma}'_c) = n\bar{\sigma}'_c d$$



الشكل (2-8) الإجهادات والانفعالات على المقطع المستطيل في حالة حدود الاستثمار

$$c = \frac{nd}{\left(n + \frac{\bar{\sigma}_s}{\bar{\sigma}'_c}\right)} = \alpha d$$

ومنه تكون:

$$\alpha = \frac{n}{\left(n + \frac{\bar{\sigma}_s}{\bar{\sigma}'_c}\right)} = \frac{c}{d} \quad (I) \quad (3-8)$$

بفرض أنّ ذراع القوة بين قوة الضغط في البيتون وقوة الشد في الفولاذ هي:

$$z = \varepsilon.d$$

$$z = \varepsilon.d = d - \frac{c}{3} = d - \frac{\alpha d}{3} = d \left(1 - \frac{\alpha}{3}\right)$$

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\alpha}{3}\right) \quad (II) \quad (4-8)$$

ومنه تكون:

• حساب الارتفاع الفعال:

إنّ العزم حول التسليح المشدود يساوي إلى العزم الخارجي:

$$M = C.z = \frac{1}{2} cb \bar{\sigma}'_c \left(d - \frac{c}{3} \right) = \frac{1}{2} cb \bar{\sigma}'_c \left[d \left(1 - \frac{\alpha}{3} \right) \right]$$

$$M = \frac{1}{2} \alpha . d . b . \bar{\sigma}'_c . d . \varepsilon = \frac{1}{2} \alpha . b . \bar{\sigma}'_c . \varepsilon . d^2$$

من هذه العلاقة التوازنية يمكن تعيين قيمة الارتفاع الفعال d:

$$d^2 = \frac{M}{\frac{1}{2} \alpha . b . \bar{\sigma}'_c . \varepsilon} = \frac{M}{b} \frac{2}{\alpha . \varepsilon . \bar{\sigma}'_c}$$

$$d = \sqrt{\frac{M}{b}} \sqrt{\frac{2}{\alpha . \varepsilon . \bar{\sigma}'_c}}$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{\alpha . \varepsilon . \bar{\sigma}'_c}} \quad (III) \quad (5-8)$$

ويكون:

$$d = \gamma \sqrt{\frac{M}{b}} \quad (IV) \quad (6-8)$$

• حساب التسليح:

إن العزم حول مركز الببتون المضغوط يساوي إلى العزم الخارجي:

$$M = T.z = A_s \bar{\sigma}_s \left(d - \frac{c}{3} \right) = A_s \bar{\sigma}_s \left[d \left(1 - \frac{\alpha}{3} \right) \right]$$

$$M = A_s \bar{\sigma}_s \varepsilon d$$

$$A_s = \frac{M}{\bar{\sigma}_s \varepsilon d} \quad (V) \quad (7-8)$$

6-8 دراسة تغيرات ثوابت المقطع المستطيل مع مواصفات المواد:

يتم دراسة تغيرات الثوابت $\alpha, \varepsilon, \gamma$ مع تغير الإجهادات المسموحة من أجل المقاطع المستطيلة

باعتبار القيم الممكنة التالية للإجهادات المسموحة في كل من الفولاذ والببتون.

الجدول (2-8) تغيرات ثوابت المقطع المستطيل مع الإجهادات الحدّية

$\bar{\sigma}_s$	$\bar{\sigma}'_c$	α	ε	γ
120	8	0.5	0.833333	0.774597
	9	0.529412	0.823529	0.713933
	10	0.555556	0.814815	0.664694
140	10	0.517241	0.827586	0.683537
	11	0.540984	0.819672	0.640334
	12	0.5625	0.8125	0.603881
160	10	0.483871	0.83871	0.702012
	11	0.507692	0.830769	0.656566
	12	0.529412	0.823529	0.618284
180	10	0.454545	0.848485	0.720119
	11	0.478261	0.84058	0.672507
	12	0.5	0.833333	0.632456
200	10	0.428571	0.857143	0.737865
	11	0.452055	0.849315	0.688159
	12	0.473684	0.842105	0.646393
220	10	0.405405	0.864865	0.755259
	11	0.428571	0.857143	0.703526
	12	0.45	0.85	0.660098
240	10	0.384615	0.871795	0.772315
	11	0.407407	0.864198	0.718617
	12	0.428571	0.857143	0.673575

- إنّ قيم النسبة α تتراوح بين حد أدنى 0.385 وحد أعلى 0.56 K بتعبير آخر: إنّ موقع المحور المحايد يتراوح بين 38% من الارتفاع الفعال إلى 56% من الارتفاع الفعال تقريباً.
- إنّ قيم النسبة ε تتراوح بين حد أدنى 0.812 وحد أعلى 0.872؛ أي إنّ الذراع بين قوة الشد والضغط يتراوح ضمن نسبة 80% من الارتفاع الفعال.
- إنّ قيمة γ تتراوح بين 0.632 و0.775 وباعتماد وحدات N,mm.

7-8 مسائل على تصميم مقطع مستطيل خاضع إلى انعطاف بسيط وفق الطريقة المرنة:

خطوات التصميم:

• حساب الثوابت الثلاثة:

$$\alpha = \frac{n}{\left(n + \frac{\bar{\sigma}_s}{\bar{\sigma}'_c}\right)} = \frac{c}{d} \quad \varepsilon = \left(1 - \frac{\alpha}{3}\right) \quad \gamma = \sqrt{\frac{2}{\alpha \cdot \varepsilon \cdot \bar{\sigma}'_c}}$$

• حساب الارتفاع الفعال ومقارنته مع الارتفاع الموجود:

$$d = \gamma \sqrt{\frac{M}{b}}$$

• حساب التسليح:

$$A_s = \frac{M}{\bar{\sigma}_s \varepsilon d}$$

• المقارنة مع مساحة التسليح القصوى:

$$A_{s\max} = \frac{1}{2} \frac{455}{(630 + f_y)} \frac{f'_c}{f_y} bd$$

• المقارنة مع مساحة التسليح الدنيا:

$$A_{s\min} = \frac{0.9}{f_y} bd$$

مثال تطبيقي (8-1):

جائر بسيط ذو مقطع مستطيل، مجازه $L=4m$ يحمل حمولة موزعة بانتظام قدرها $W=120kN$

والمطلوب تصميم الجائر وفق الطريقة المرنة: $f'_c = 20MPa$ $f_y = 280MPa$

الحل:

1- عزم الانعطاف:

$$M = \frac{WL^2}{8} = 240kN.m$$

2- الإجهادات المسموحة:

$$\bar{\sigma}_s = 0.55f_y = 154MPa \quad \bar{\sigma}'_c = 0.45f'_c = 9MPa$$

3- أبعاد المقطع البيتوني: بفرض عرض الجائز يساوي إلى 250mm:

- حساب الثوابت الثلاثة:

$$\alpha = \frac{n}{\left(n + \frac{\bar{\sigma}_s}{\bar{\sigma}'_c}\right)} = \frac{15}{\left(15 + \frac{154}{9}\right)} = 0.467$$

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\alpha}{3}\right) = \left(1 - \frac{0.467}{3}\right) = 0.844$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{\alpha \cdot \varepsilon \cdot \bar{\sigma}'_c}} = \sqrt{\frac{2}{0.467 \times 0.844 \times 9}} = 0.75$$

- حساب الارتفاع الفعال:

$$d = \gamma \sqrt{\frac{M}{b}} = 0.75 \sqrt{\frac{240 \times 10^6}{250}} = 735.5 \text{mm} \Rightarrow d = 740 \text{mm}, H = 800 \text{mm}$$

- 4- حساب التسليح:

$$A_s = \frac{M}{\bar{\sigma}_s \varepsilon d} = \frac{240 \times 10^6}{154 \times 0.844 \times 740} = 2494.4 \text{mm}^2$$

- المقارنة مع مساحة التسليح القصوى:

$$A_{s \max} = \frac{1}{2} \frac{455}{(630 + f_y)} \frac{f'_c}{f_y} b d = 2678.6 \text{mm}^2$$

- المقارنة مع مساحة التسليح الدنيا:

$$A_{s \min} = \frac{0.9}{f_y} b d = 482.14 \text{mm}^2$$

مثال تطبيقي (2-8):

مقطع مستطيل أبعاده $b=200\text{mm}$, $d=600\text{mm}$ يخضع إلى عزم انعطاف قدره

$M=120\text{kN.m}$ والمطلوب:

- التحقق من كفاية المقطع البيتوني.

- حساب مساحة التسليح

وذلك وفق الطريقة المرنة: $f'_c = 20MPa$ $f_y = 300MPa$

الحل:

• الإجهادات المسموحة:

$$\bar{\sigma}_s = 0.55f_y = 165MPa \quad \bar{\sigma}'_c = 0.45f'_c = 9MPa$$

• التحقق من كفاية المقطع البيتوني:

○ حساب الثوابت الثلاثة:

$$\alpha = \frac{n}{\left(n + \frac{\bar{\sigma}_s}{\bar{\sigma}'_c}\right)} = \frac{15}{\left(15 + \frac{165}{9}\right)} = 0.45$$

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\alpha}{3}\right) = \left(1 - \frac{0.45}{3}\right) = 0.85$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{\alpha \cdot \varepsilon \cdot \bar{\sigma}'_c}} = \sqrt{\frac{2}{0.45 \times 0.85 \times 9}} = 0.762$$

○ حساب الارتفاع الفعال ومقارنته مع الارتفاع الموجود:

$$d = \gamma \sqrt{\frac{M}{b}} = 0.75 \sqrt{\frac{120 \times 10^6}{200}} = 590.4mm$$

بما أنَّ الارتفاع الفعال اللازم أقل من الارتفاع الفعال الموجود فهو مقبول.

• حساب التسليح:

$$A_s = \frac{M}{\bar{\sigma}_s \varepsilon d} = \frac{120 \times 10^6}{165 \times 0.85 \times 600} = 1426mm^2$$

• المقارنة مع مساحة التسليح القصوى:

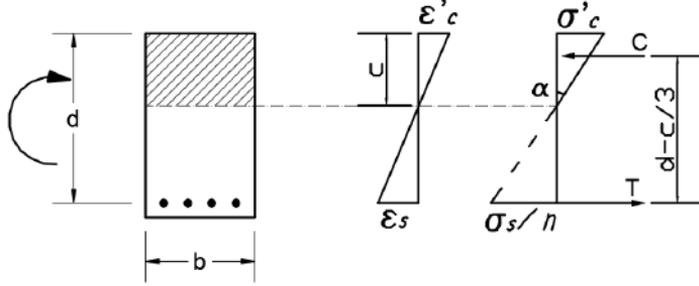
$$A_{s \max} = \frac{1}{2} \frac{455}{(630 + f_y)} \frac{f'_c}{f_y} bd = 1957mm^2$$

• المقارنة مع مساحة التسليح الدنيا:

$$A_{s \min} = \frac{0.9}{f_y} bd = 360mm^2$$

8-8 تدقيق الإجهادات في مقطع مستطيل أحادي التسليح معرض إلى انعطاف بسيط:

بفرض وجود مقطع مستطيل خاضع إلى انعطاف بسيط معروف بأبعاده b, d ومساحة تسليحه A_s والمطلوب تدقيق الإجهادات الأعظمية الحاصلة في البيتون وفولاذ التسليح.



الشكل (3-8) الإجهادات على المقطع المستطيل أحادي التسليح

1- إيجاد نسبة المحور المحايد إلى الارتفاع الفعال α :

من شرط توازن القوى الداخلية:

$$C = T \Rightarrow \frac{1}{2} c.b.\sigma'_c = A_s \sigma_s$$

$$c = \alpha d \quad A_s = \mu_s b d$$

ولكن:

بالتعويض:

$$\frac{1}{2} \alpha d.b.\sigma'_c = A_s \sigma_s \Rightarrow \frac{1}{2} \alpha.\sigma'_c = \frac{A_s}{b d} \sigma_s$$

$$\sigma'_c = \mu_s \sigma_s \frac{2}{\alpha}$$

من تشابه المثلثات:

$$\frac{\sigma'_c}{c} = \frac{\sigma_s/n}{d-c} \Rightarrow \frac{d-c}{c} = \frac{\sigma_s/n}{\sigma'_c}$$

$$\frac{\sigma_s/n}{\sigma'_c} = \frac{d-\alpha d}{\alpha d} = \frac{1-\alpha}{\alpha}$$

$$\sigma_s = n \sigma'_c \frac{1-\alpha}{\alpha}$$

بالتعويض في معادلة إجهاد الضغط في البيتون:

$$\sigma'_c = \mu_s \sigma_s \frac{2}{\alpha} = \mu_s n \bar{\sigma}'_c \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{2}{\alpha} \Rightarrow \alpha = 2\mu_s n \bar{\sigma}'_c \frac{1-\alpha}{\alpha}$$

وهي علاقة من الدرجة الثانية بالنسبة للنسبة α ويمكن كتابتها بالشكل:

$$\alpha^2 + (2\mu_s n)\alpha - 2\mu_s n = 0$$

حلها من الشكل:

$$\alpha = -\mu_s n + \sqrt{(\mu_s n)^2 + 2\mu_s n} \quad (8-8)$$

2- إيجاد الإجهادات في الفولاذ والبيتون:

من شرط توازن العزوم:

$$M = T.z = A_s \sigma_s \left(d - \frac{c}{3} \right) = A_s \sigma_s \left[d \left(1 - \frac{\alpha}{3} \right) \right]$$

$$M = A_s \sigma_s \varepsilon d \quad (9-8)$$

$$\sigma_s = \frac{M}{A_s \varepsilon d} \quad (10-8)$$

من العلاقة التناسبية $\sigma_s = n \sigma'_c \frac{1-\alpha}{\alpha}$ يتم الحصول على الإجهاد في البيتون:

$$\sigma'_c = \sigma_s \frac{\alpha}{n(1-\alpha)}$$

3- خطوات تدقيق الإجهادات في مقطع معطي:

- حساب النسبة α بدلالة نسبة التسليح μ_s وأمثلة التعادل n .
- حساب النسبة $\varepsilon = 1 - \alpha/3$.
- حساب الإجهادات في الفولاذ والبيتون ومقارنتها مع الإجهادات المسموحة، ويتم تمييز الحالات الأتية:

- الإجهاد في البيتون أقل من الإجهاد المسموح $\sigma'_c < \bar{\sigma}'_c$ يكون الارتفاع المفروض d أكبر من الارتفاع اللازم من أجل المقطع المتوازن.

- الإجهاد في البيتون يساوي إلى الإجهاد المسموح $\sigma'_c = \bar{\sigma}'_c$ يكون الارتفاع المفروض d يساوي إلى الارتفاع اللازم من أجل المقطع المتوازن.
- الإجهاد في البيتون أكبر من الإجهاد المسموح $\sigma'_c > \bar{\sigma}'_c$ يكون الارتفاع المفروض d أصغر من الارتفاع اللازم من أجل المقطع المتوازن ويجب زيادة الارتفاع أو إضافة تسليح ضغط.

4- دراسة تغيّرات النسبة α والنسبة ε بالنسبة لمختلف قيم نسبة التسليح:

بدراسة تغيّرات النسب α, ε مع قيم نسب التسليح الممكنة يتم الحصول على الجدول التالي:

الجدول (3-8) تغيّرات ثوابت المقطع المستطيل مع نسبة التسليح

μ_s	α	ε
0.008	0.384381	0.871873
0.009	0.401866	0.866045
0.01	0.417891	0.860703
0.011	0.432683	0.855772
0.012	0.446418	0.851194
0.013	0.459236	0.846921
0.014	0.471249	0.842917
0.015	0.482549	0.83915
0.016	0.493212	0.835596
0.017	0.503304	0.832232
0.018	0.512879	0.82904
0.019	0.521985	0.826005
0.02	0.530662	0.823113

8-9 المقطع المتوازن والعزم المقاوم:

8-9-1 المقطع المتوازن:

هو المقطع الذي تكون فيه إجهادات البيتون والتسليح مساوية للإجهادات المسموحة $\bar{\sigma}'_c, \bar{\sigma}'_s$ وهو المقطع الاقتصادي الوحيد، فحسب الضرورة المعمارية قد يتم استعمال ارتفاع أكبر من الارتفاع المتوازن، وفي هذه الحالة يمكن حساب فولاذ الشد بحيث يكون الإجهاد فيه هو الإجهاد المسموح $\bar{\sigma}'_s$ بينما

يكون إجهاد الضغط في البيتون أكبر من الإجهاد المسموح $\bar{\sigma}'_c$ فلا بد عندها من دعم منطقة الضغط باستعمال تسليح مضغوط ليتحمل جزءاً من الضغط وبالتالي إرجاع إجهاد الضغط في البيتون إلى القيمة المسموحة.

8-9-2 العزم المقاوم M_r :

إنَّ العزم المقاوم في مقطع ذي أبعاد مفروضة هو العزم الأعظم الذي يتحمّله المقطع بحيث تكون الإجهادات في البيتون والفولاذ مساوية للإجهادات المسموحة $\bar{\sigma}'_c, \bar{\sigma}_s$. يمكن تمييز الحالات:

- إذا كان العزم المطبق على المقطع أصغر من العزم المقاوم $M < M_r$ يكون المقطع المفروض أكبر من المقطع المتوازن، وفي هذه الحالة يتمُّ حساب مساحة التسليح A_s بناءً على الإجهاد المسموح في الفولاذ $\bar{\sigma}_s$ ، ويكون إجهاد الضغط في البيتون أقل من الإجهاد المسموح.
- إذا كان العزم المطبق مساوياً إلى العزم المقاوم $M = M_r$ يكون المقطع المفروض متوازناً والإجهادات في كل من الفولاذ والبيتون مساوية للإجهادات المسموحة $\bar{\sigma}'_c, \bar{\sigma}_s$.
- إذا كان العزم المطبق على المقطع أكبر من العزم المقاوم $M > M_r$ يكون المقطع المفروض أكبر من المقطع المتوازن وإجهاد الضغط في البيتون أكبر من الإجهاد المسموح وإرجاعه إلى القيمة المسموحة $\bar{\sigma}'_c$ لابد من زيادة أبعاد المقطع أو إضافة تسليح ضغط.

وللحصول على العزم المقاوم يتم اعتبار أدنى القيمتين:

$$M_{r1} = A_s \bar{\sigma}_s \varepsilon d \quad M_{r2} = \frac{1}{2} b d^2 \alpha \varepsilon \bar{\sigma}'_c \quad (11-8)$$

يمكن تمييز الحالات التالية:

- إذا كانت قيمة $M_{r1} > M_{r2}$ يكون الإجهاد في الفولاذ أقل من المسموح (فولاذ فائض) بينما يكون الإجهاد في البيتون مساوياً للإجهاد المسموح ويتم اعتماد $M = M_{r2}$.
- إذا كانت قيمة $M_{r1} < M_{r2}$ يكون الإجهاد في الفولاذ يساوي الإجهاد المسموح بينما يكون الإجهاد في البيتون أقل من الإجهاد المسموح (بيتون فائض) ويتم اعتماد $M = M_{r1}$.
- إذا كانت قيمة $M_{r1} = M_{r2}$ يكون الإجهاد في الفولاذ يساوي الإجهاد المسموح وأيضاً يكون الإجهاد في البيتون مساوياً للإجهاد المسموح ويكون المقطع متوازناً.

مثال تطبيقي (3-8):

مقطع مستطيل أبعاده $b=200\text{mm}$, $d=650\text{mm}$ مسلح بتسليح شد قدره $A_s=1884\text{mm}^2$ ،

يخضع إلى عزم انعطاف قدره $M=150\text{kN.m}$ والمطلوب تدقيق الإجهادات:

$$f_y = 280\text{MPa} \quad f'_c = 20\text{MPa}$$

الحل:

• الإجهادات المسموحة:

$$\bar{\sigma}_s = 0.55f_y = 154\text{MPa} \quad \bar{\sigma}'_c = 0.45f'_c = 9\text{MPa}$$

• حساب نسبة التسليح:

$$\mu_s = \frac{A_s}{bd} = \frac{1884}{200 \times 650} = 0.0145$$

$$n\mu_s = 15 \times 0.0145 = 0.2175$$

• إيجاد الثوابت:

$$\alpha = -\mu_s n + \sqrt{(\mu_s n)^2 + 2\mu_s n} = -0.2175 + \sqrt{(0.2175)^2 + 2 \times 0.2175} = 0.477$$

$$\varepsilon = 1 - \alpha/3 = 0.841$$

• تدقيق الإجهادات:

$$\sigma_s = \frac{M}{A_s \varepsilon d} = \frac{150 \times 10^6}{1884 \times 0.841 \times 650} = 145.64\text{MPa} < \bar{\sigma}_s = 154\text{MPa}$$

$$\sigma'_c = \sigma_s \frac{\alpha}{n(1-\alpha)} = 145.64 \frac{0.477}{15(1-0.477)} = 8.85 < \bar{\sigma}'_c = 9\text{MPa}$$

يُلاحظ أن الإجهاد في البيتون قريب جداً من الإجهاد المسموح؛ أي إنه قريب من المقطع التوازني بينما الإجهاد في الفولاذ أقل بقليل من الإجهاد المسموح فهناك فائض بسيط في التسليح.

مثال تطبيقي (4-8):

مقطع مستطيل من البيتون المسلح أبعاده $200 \times 550 \text{mm}$ مسلح بتسليح أحادي قدره 1016mm^2 والمطلوب تعيين العزم الأعظم الذي يمكن أن يتحمّله المقطع مع العلم أنّ مواصفات المواد:

$$f_y = 300 \text{MPa} \quad f'_c = 18 \text{MPa}$$

الحل:

- الإجهادات المسموحة:

$$\bar{\sigma}_s = 0.55f_y = 165 \text{MPa} \quad \bar{\sigma}'_c = 0.45f'_c = 8.1 \text{MPa}$$

- حساب الثوابت:

$$\alpha = \frac{n}{\left(n + \frac{\bar{\sigma}_s}{\bar{\sigma}'_c}\right)} = \frac{15}{\left(15 + \frac{165}{8.1}\right)} = 0.424$$

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\alpha}{3}\right) = \left(1 - \frac{0.424}{3}\right) = 0.858$$

- العزم المقاوم بالنسبة للبيتون:

بفرض التغطية $d' = 50 \text{mm}$ يكون الارتفاع الفعال $d = 500 \text{mm}$

$$M_{rc} = \frac{1}{2} b d^2 \alpha \varepsilon \bar{\sigma}'_c = \frac{1}{2} 200 \times 500^2 \times 0.424 \times 0.858 \times 8.1 = 73.74 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

- العزم المقاوم بالنسبة للفولاذ:

$$M_{rs} = A_s \bar{\sigma}_s \varepsilon d = 1016 \times 165 \times 0.858 \times 500 = 71.97 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

يتّم اعتماد القيمة الأصغر، ويكون العزم المقاوم الذي يتحمّله المقطع

$$M_r = M_{rs} = 71.97 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

حيث إنّ الفولاذ يعمل على الإجهاد المسموح في حين هناك فائض بسيط في البيتون؛ أيّ إنّه يعمل على إجهاد أقلّ من الإجهاد المسموح.

$$\bar{\sigma}'_c = \frac{2M_r}{b d^2 \alpha \varepsilon} = \frac{2 \times 71.97 \times 10^6}{200 \times 500^2 \times 0.424 \times 0.858} = 7.91 \text{MPa} < 8.1 \text{MPa}$$

مثال تطبيقي (5-8):

مقطع مستطيل أبعاده $b=200\text{mm}$, $d=550\text{mm}$ مسلح بتسليح شد بنسبة قدرها 1%، يخضع إلى عزم

انعطاف قدره $M=110\text{kN.m}$ والمطلوب تدقيق الإجهادات: $f'_c = 20\text{MPa}$ $f_y = 360\text{MPa}$

الحل:

• الإجهادات المسموحة:

$$\bar{\sigma}_s = 0.55f_y = 198\text{MPa} \quad \bar{\sigma}'_c = 0.45f'_c = 9\text{MPa}$$

$$n\mu_s = 15 \times 0.01 = 0.15$$

• إيجاد الثوابت:

$$\alpha = -\mu_s n + \sqrt{(\mu_s n)^2 + 2\mu_s n} = -0.15 + \sqrt{(0.15)^2 + 2 \times 0.15} = 0.418$$

$$\varepsilon = 1 - \alpha/3 = 0.861$$

• تدقيق الإجهادات:

$$A_s = \mu_s b d = 1100\text{mm}^2$$

$$\sigma_s = \frac{M}{A_s \varepsilon d} = \frac{110 \times 10^6}{1100 \times 0.861 \times 550} = 211.24\text{MPa} > \bar{\sigma}_s = 198\text{MPa}$$

$$\sigma'_c = \sigma_s \frac{\alpha}{n(1-\alpha)} = 211.24 \frac{0.418}{15(1-0.418)} = 10.11 > \bar{\sigma}'_c = 9\text{MPa}$$

يُلاحظ أنَّ الإجهاد في الببتون والفولاذ يتجاوز الإجهاد المسموح، تتمُّ زيادة ارتفاع المقطع الببتوني إلى

: $d=600\text{mm}$

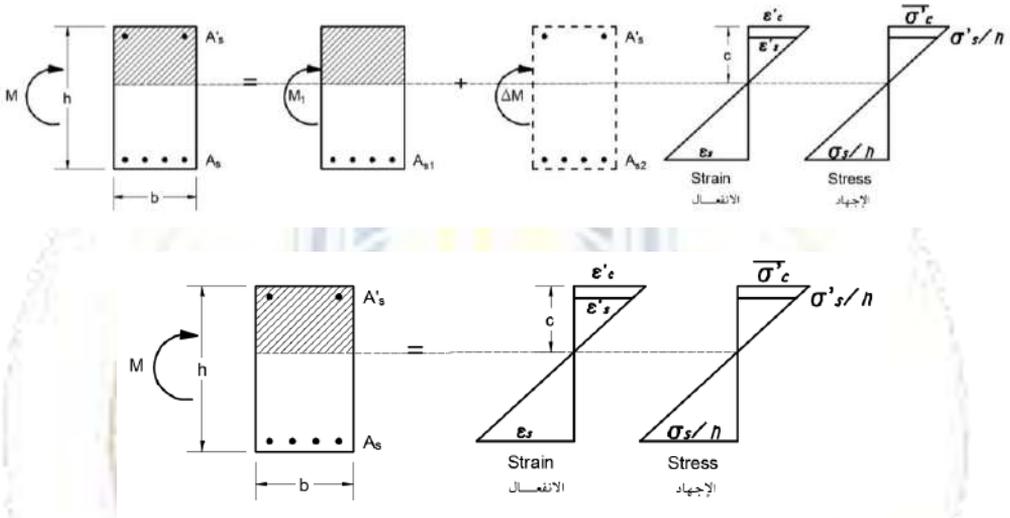
$$A_s = \mu_s b d = 1200\text{mm}^2$$

$$\sigma_s = \frac{M}{A_s \varepsilon d} = \frac{110 \times 10^6}{1200 \times 0.861 \times 600} = 177.5\text{MPa} < \bar{\sigma}_s = 198\text{MPa}$$

$$\sigma'_c = \sigma_s \frac{\alpha}{n(1-\alpha)} = 177.5 \frac{0.418}{15(1-0.418)} = 8.5 < \bar{\sigma}'_c = 9\text{MPa}$$

10-8 تصميم المقاطع ثنائية التسليح الخاضعة إلى انعطاف بسيط:

توجد عدة طرائق لتصميم المقاطع ثنائية التسليح الخاضعة إلى انعطاف بسيط، بعضها دقيق وبعضها الآخر تقريبي. سوف يتم عرض طريقة واحدة فقط تُعطي نتائج دقيقة تسمى طريقة فرق العزم. باعتبار المقطع المستطيل ثنائي التسليح المبين بالشكل، الخاضع إلى عزم انعطاف M . تتم تجزئة المقطع إلى مقطعين وهميين:

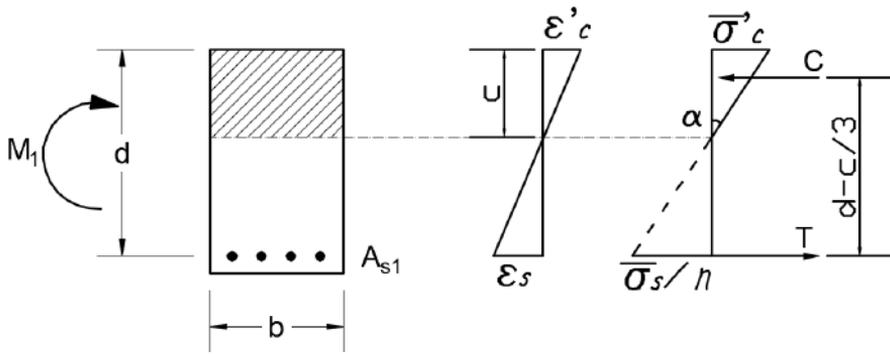


الشكل (4-8) المقطع ثنائي التسليح في حالة حدود الاستثمار

من تشابه المثلثات يمكن إيجاد الإجهاد في الفولاذ المشدود:

$$\sigma_s = n \bar{\sigma}'_c \frac{c-d}{c} \quad (12-8)$$

- المقطع الوهمي الأول: هو مقطع متوازن مسلح بتسليح A_{s1} ويخضع إلى عزم انعطاف قدره M_1 هو جزء من العزم M ويساوي إلى:



الشكل (5-8) الإجهادات والانفعالات على المقطع الوهمي الأول

$$M_1 = T.z = A_s \bar{\sigma}_s \left(d - \frac{c}{3} \right) = A_s \bar{\sigma}_s \left[d \left(1 - \frac{\alpha}{3} \right) \right]$$

$$M_1 = A_s \bar{\sigma}_s \epsilon d$$

$$A_{s1} = \frac{M_1}{\bar{\sigma}_s \epsilon d} \quad (13-8)$$

حيث:

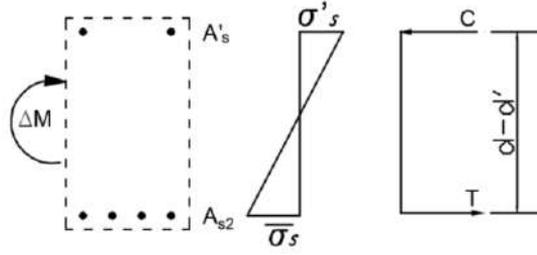
$$M_1 = \frac{d^2}{\gamma^2} b \quad (14-8)$$

إن فرق العزمين ΔM يتحمله المقطع الوهمي الثاني حيث يكون مسلحاً بتسليح مضغوط A'_s يعمل بإجهاد قدره σ'_s وتسليح مشدود A_s يعمل بإجهاد قدره $\bar{\sigma}_s$ وهو الإجهاد المسموح.

- المقطع الوهمي الثاني: المقطع مؤلف من تسليح شد A_s وتسليح ضغط A'_s وهو يقاوم فرق العزمين:

$$\Delta M = M - M_1$$

بأخذ العزم حول مركز قوة الضغط في الفولاذ المضغوط:



الشكل (6-8) الإجهادات والانفعالات على المقطع الوهمي الثاني

$$\Delta M = A_{s2} \bar{\sigma}_s (d - d')$$

$$A_{s2} = \frac{\Delta M}{\bar{\sigma}_s (d - d')} \quad (15-8)$$

وبأخذ العزم حول مركز قوة الشد في الفولاذ المضغوط:

$$\Delta M = A'_s \sigma'_s (d - d') \quad (16-8)$$

$$A'_s = \frac{\Delta M}{\sigma'_s (d - d')} \quad (17-8)$$

حيث يُحسب الإجهاد في تسليح الضغط:

$$\sigma'_s = n \bar{\sigma}'_c \frac{c - d'}{c} \quad (18-8)$$

ويكون التسليح المشدود الكلي:

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} = \frac{M_1}{\bar{\sigma}_s \epsilon d} + \frac{\Delta M}{\bar{\sigma}_s (d - d')} \quad (19-8)$$

إنّ تسليح الجيزان الخاضعة للانعطاف البسيط بشكل ثنائي كسباً للارتفاع هو أمر غير اقتصادي غطلاً، لذلك لا يلجأ المهندس إلى هذه الطريقة إلا في حالات استثنائية.

1-10-8 حساب الإجهادات في المقاطع المستطيلة ثنائية التسليح الخاضعة للانعطاف البسيط:

- يتم إيجاد النسبة α بالاعتماد على معادلة العزم الستاتيكي حول المحور المحايد الذي يجب أن يساوي إلى الصفر في المقطع المتجانس:

$$b \frac{c^2}{2} + n A'_s (c - d') - n A_s (d - c) = 0$$

ولكن:

$$c = \alpha d \quad A_s = \mu_s bd \quad A'_s = \mu'_s bd$$

$$\alpha^2 + 2n\alpha(\mu_s + \mu'_s) - 2n\left(\mu'_s \frac{d'}{d} + \mu_s\right) = 0 \quad (20-8)$$

بحل المعادلة يتمَّ الحصول على قيمة α ومنها يمكن حساب ε وتكون الإجهادات:

$$\sigma_s = \frac{M}{A_s \varepsilon d} \quad \bullet \quad \text{الإجهاد في تسليح الشد:}$$

$$\sigma'_c = \sigma_s \frac{\alpha}{n(1-\alpha)} \quad \bullet \quad \text{الإجهاد في البيتون المضغوط:}$$

طريقة ثانية:

- يتم تحديد ارتفاع المنطقة المضغوطة c وذلك بالاعتماد على معادلة العزم الستاتيكي حول المحور المحايد الذي يجب أن يساوي إلى الصفر في المقطع المتجانس:

$$b \frac{c^2}{2} + nA'_s(c - d') - nA_s(d - c) = 0$$

- حساب عزم العطالة المتجانس:

$$I_e = b \frac{c^3}{3} + nA'_s(c - d')^2 + nA_s(d - c)^2$$

- حساب الإجهادات في كل من البيتون والفولاذ:

$$\sigma'_c = \frac{M}{I_e} c$$

$$\sigma'_s = n \frac{M}{I_e} (c - d')$$

$$\sigma_s = n \frac{M}{I_e} (d - c)$$

مثال تطبيقي (6-8):

مقطع من البيتون المسلح مستطيل الشكل، أبعاده $200 \times 650 \text{mm}$ يخضع لعزم انعطاف قدره

$M=160 \text{kN.m}$. صمم التسليح اللازم إذا علمت أن:

$$f_y = 300 \text{MPa} \quad f'_c = 20 \text{MPa} \quad d' = 60 \text{mm}$$

الحل:

1- الإجهادات المسموحة:

$$\bar{\sigma}_s = 0.55 f_y = 165 \text{MPa} \quad \bar{\sigma}'_c = 0.45 f'_c = 9 \text{MPa}$$

2- تحقيق الارتفاع الفعال:

• حساب الثوابت الثلاثة:

$$\alpha = \frac{n}{\left(n + \frac{\bar{\sigma}_s}{\bar{\sigma}'_c}\right)} = \frac{15}{\left(15 + \frac{165}{9}\right)} = 0.45$$

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\alpha}{3}\right) = \left(1 - \frac{0.45}{3}\right) = 0.85$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{\alpha \cdot \varepsilon \cdot \bar{\sigma}'_c}} = \sqrt{\frac{2}{0.45 \times 0.85 \times 9}} = 0.762$$

• حساب الارتفاع الفعال:

$$d = \gamma \sqrt{\frac{M}{b}} = 0.762 \sqrt{\frac{160 \times 10^6}{200}} = 681.75 \text{mm} > d = 650 - 60 = 590 \text{mm}$$

3- تسليح الشد:

a. تسليح المقطع الوهمي الأول:

$$M_1 = \frac{d^2}{\gamma^2} b = \frac{590^2}{0.762^2} 200 = 119.83 \times 10^6 \text{ kN.m}$$

$$A_{s1} = \frac{M_1}{\bar{\sigma}_s \varepsilon d} = \frac{119.83 \times 10^6}{165 \times 0.85 \times 590} = 1448.2 \text{mm}^2$$

b. تسليح المقطع الوهمي الثاني:

$$\Delta M = M - M_1 = 40.17 \text{ kN.m}$$

$$A_{s2} = \frac{\Delta M}{\bar{\sigma}_s (d - d')} = \frac{40.17 \times 10^6}{165(590 - 60)} = 459.31 \text{ mm}^2$$

ويكون التسليح المشدود الكلي:

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} = 1907.5 \text{ mm}^2$$

4- تسليح الضغط:

يُحسب الإجهاد في تسليح الضغط:

$$c = \alpha d = 265.5 \text{ mm}$$

$$\sigma'_s = n \bar{\sigma}'_c \frac{c - d'}{c} = 15 \times 9 \frac{265.5 - 60}{265.5} = 104.5 \text{ MPa}$$

$$A'_s = \frac{\Delta M}{\sigma'_s (d - d')} = \frac{40.17 \times 10^6}{104.5(590 - 60)} = 725.3 \text{ mm}^2$$

مثال تطبيقي (7-8):

المطلوب تدقيق إجهادات مقطع مستطيل مسلح على الشد والضغط يخضع إلى عزم انعطاف

قدره $M=180 \text{ kN.m}$ علماً بأن أبعاد المقطع $b=200 \text{ mm}$, $H=700 \text{ mm}$, $d'=50 \text{ mm}$

$$A_s = 2200 \text{ mm}^2, A'_s = 1200 \text{ mm}^2, f_y = 360 \text{ MPa}, f'_c = 20 \text{ MPa}$$

الحل:

• الإجهادات المسموحة:

$$\bar{\sigma}_s = 0.55 f_y = 198 \text{ MPa} \quad \bar{\sigma}'_c = 0.45 f'_c = 9 \text{ MPa}$$

• يتم تحديد ارتفاع المنطقة المضغوطة c وذلك بالاعتماد على معادلة العزم الستاتيكي حول

المحور المحايد الذي يجب أن يساوي إلى الصفر في المقطع المتجانس:

$$b \frac{c^2}{2} + n A'_s (c - d') - n A_s (d - c) = 0$$

$$200 \frac{c^2}{2} + 15 \times 1200(c - 50) - 15 \times 2200(650 - c) = 0$$

$$100c^2 + 51000c - 22350000 = 0$$

وهي معادلة من الدرجة الثانية بحلها يتّم الحصول على قيمة c:

$$c = 282.15 \text{ mm}$$

• حساب عزم العطالة المتجانس:

$$\begin{aligned} I_e &= b \frac{c^3}{3} + nA_s'(c - d')^2 + nA_s(d - c)^2 = \\ &= 200 \frac{282.15^3}{3} + 15 \times 1200(282.15 - 50)^2 + 15 \times 2200(650 - 282.15)^2 \\ &= 6932.873 \times 10^6 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

• حساب الإجهادات في كل من البيتون والفولاذ:

$$\sigma'_c = \frac{M}{I_e} c = \frac{180 \times 10^6}{6932.873 \times 10^6} 282.15 = 7.325 \text{ MPa} < \bar{\sigma}'_c$$

$$\sigma'_s = n \frac{M}{I_e} (c - d') = 15 \frac{180}{6932.873} (282.15 - 50) = 90.41 \text{ MPa} < \bar{\sigma}_s$$

$$\sigma_s = n \frac{M}{I_e} (d - c) = 15n \frac{180}{6932.873} (650 - 282.15) = 143.26 \text{ MPa} < \bar{\sigma}_s$$

والإجهادات جميعها محقّقة.

8-11 تصميم المقاطع بشكل T الخاضعة إلى الانعطاف البسيط:

8-11-1 الطريقة التقريبية- حالة تسليح شد فقط:

في هذه الحالة تكون أبعاد المقطع مفروضة، والإجهاد في الفولاذ يصل إلى الإجهاد المسموح

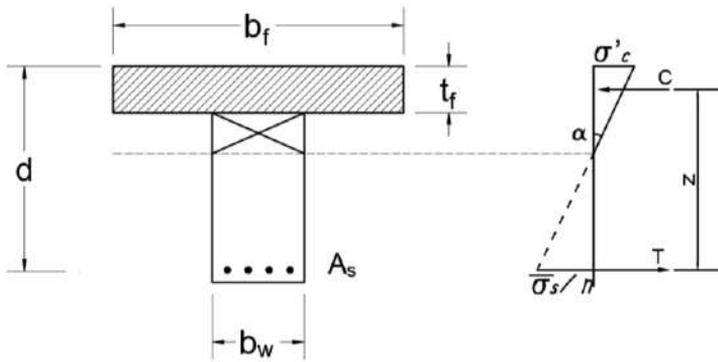
$\bar{\sigma}_s$. في حين يُطلب تعيين مساحة الفولاذ المشدود A_s وحساب الإجهاد في الليف العلوي للبيتون σ'_c .

إنّ الحل التقريبي يُعطي نتائج مقبولة في أكثر الحالات التي توجد في الواقع العملي حيث يتّم افتراض

كون الجناح بكامله مضغوطاً وإهمال جزء الجذع المضغوط.

- يتمُّ فرض ذراع الرافعة Lever arm ويمكن اعتماد القيمة $z=d-t_f/2$ أو $z=0.9H$ كتقريب مناسب. أي إنَّ محصلة قوى الضغط تكون في منتصف الجناح وهاتان القيمتان تُعطيان نتائج مقبولة.
- يُحسب مقطع الفولاذ المشدود من العلاقة:

$$A_s = \frac{M}{\bar{\sigma}_s z}$$

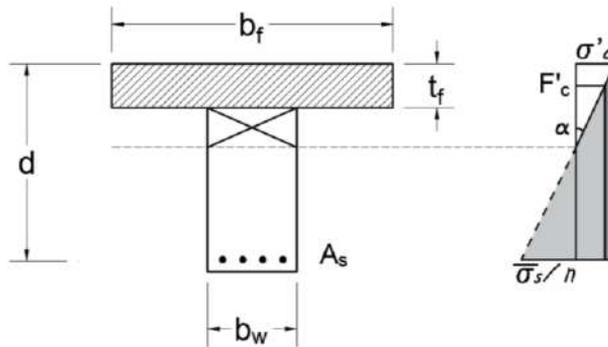


الشكل (7-8) الطريقة التقريبية في تسليح المقطع T

- من أجل حساب الإجهاد في الليف العلوي للبيتون σ'_c ، يتمُّ إهمال المنطقة من الجذع بين المحور المحايد وأسفل الجناح، وتكون محصلة قوى الضغط في البيتون:

$$C = b_f t_f F'_c$$

حيث F'_c هي الإجهاد في منتصف الجناح ويُحسب من تشابه المثلثين المظللين بالشكل (8-8)



الشكل (8-8) الإجهادات على المقطع T

$$\frac{d - t_f / 2}{d} = \frac{\bar{\sigma}'_s / n + F'_c}{\bar{\sigma}'_s / n + \sigma'_c}$$

من هذه المعادلة يتم إيجاد F'_c :

$$F'_c = \frac{(d - t_f / 2)}{d} (\bar{\sigma}'_s / n + \sigma'_c) - \bar{\sigma}'_s / n$$

وتكون معادلة توازن القوى الأفقية:

$$C = T$$

$$b_f t_f F'_c = A_s \bar{\sigma}'_s$$

بتعويض قيمة F'_c يتم الحصول على إجهاد الضغط في أعلى الجناح σ'_c :

$$\sigma'_c = \bar{\sigma}'_s / n \left[\left(1 + \frac{n A_s}{b_f t_f} \right) \frac{d}{(d - t_f / 2)} - 1 \right]$$

يمكن تمييز الحالات التالية:

- في حال كون $\sigma'_c \leq \bar{\sigma}'_c$ وهي الحالة الغالبة يكون الارتفاع كافياً.
- في حال كون $\sigma'_c > \bar{\sigma}'_c$ وهي حالة نادرة الحدوث في الواقع، عندها يجب زيادة الارتفاع إذا كان ذلك ممكناً أو إضافة تسليح ضغط لمقاومة الإجهادات الفائضة وبالتالي يتم اللجوء إلى الطريقة الدقيقة.

8-11-2 الطريقة الدقيقة-حالة تسليح ثنائي:

هذه الطريقة صالحة من أجل التسليح الأحادي والتسليح الثنائي. فإذا كان الارتفاع الموجود كافياً فإن الإجهاد في البيتون في أعلى الجناح يكون أصغر من الإجهاد المسموح $\sigma'_c \leq \bar{\sigma}'_c$ ولا توجد حاجة إلى تسليح ضغط. بينما عندما يزيد الإجهاد في الليف العلوي على الإجهاد المسموح في البيتون فيجب عندها إضافة تسليح ضغط.

يُفترض كون المحور المحايد يقطع الجذع/الجسد، عندها يمكن تقسيم المنطقة المضغوطة من البيتون إلى قسمين، القسم الأول يتألف من الجذع وهو مستطيل ذو عرض b_w وارتفاع c . والقسم الثاني هو جزأي الجناح.

- قوة الضغط في الجذع:

تكون الإجهادات في الجذع مثلثة الشكل وتُعطى محصلة القوى بالمعادلة:

$$C_w = \frac{1}{2} b_w c \bar{\sigma}'_c$$

C: موقع المحور المحايد ويُعطى بالمعادلة:

$$c = \frac{n}{n + \frac{\bar{\sigma}'_s}{\bar{\sigma}'_c}} d$$

يقع مركز ثقل القوة C_w على مسافة قدرها $c/3$ من الليف العلوي. وذراع الرافعة لهذه القوة هو:

$$z_w = \epsilon d = (1 - \alpha/3)d$$

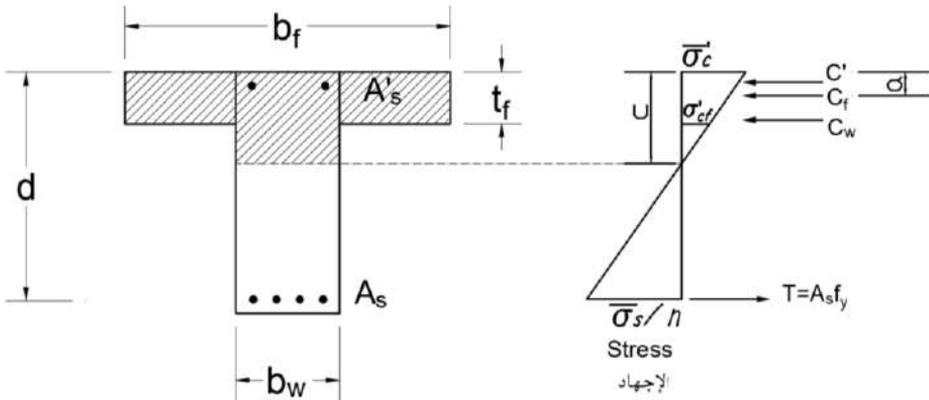
• قوة الضغط في جزأي الجناح:

تتوزع الإجهادات في جزأي الجناح بشكل شبه منحرف يساوي فيه الإجهاد الكبير إلى $\bar{\sigma}'_c$ والإجهاد الصغير إلى:

$$\sigma'_{cf} = \bar{\sigma}'_c \frac{c - t_f}{c}$$

وتكون محصلة قوى الضغط في جزأي الجناح:

$$C_f = \frac{\bar{\sigma}'_c + \sigma'_{cf}}{2} (b_f - b_w) t_f$$



الشكل (8-9) قوى الضغط والتشد على المقطع T

$$C_f = \bar{\sigma}'_c \left[1 + \frac{c - t_f}{c} \right] \frac{(b_f - b_w) t_f}{2} = \bar{\sigma}'_c (b_f - b_w) t_f \left[1 - \frac{t_f}{2c} \right]$$

تؤثر هذه القوة في مركز ثقل شبه المنحرف لمخطط الإجهادات في الجناح ويرمز إلى البعد بين مركز الثقل والليف العلوي بالرمز a ويُعطى بحسب خواص شبه المنحرف:

$$a = \frac{t_f}{3} \frac{3c - 2t_f}{2c - t_f} \quad (21-8)$$

ويكون ذراع الرافعة في هذه القوة:

$$z_f = d - a$$

• قوة الضغط في الفولاذ المضغوط:

$$C' = A'_s \sigma'_s$$

حيث يكون إجهاد الضغط في الفولاذ المضغوط:

$$\sigma'_s = n \bar{\sigma}'_c \frac{c - d'}{c}$$

ويكون ذراع الرافعة لهذه القوة:

$$z' = d - d'$$

• قوة الشد في الفولاذ المشدود:

$$T = A_s \bar{\sigma}_s$$

بتطبيق شرطي توازن المقطع:

أ. شرط توازن القوى المحورية:

$$T = C_w + C_f + C'$$

$$A_s \bar{\sigma}_s = \frac{1}{2} b_w c \bar{\sigma}'_c + \bar{\sigma}'_c \left[1 + \frac{c - t_f}{c} \right] \frac{(b_f - b_w) t_f}{2} + A'_s \sigma'_s$$

$$A_s = \frac{1}{\bar{\sigma}_s} \left[\frac{1}{2} b_w c \bar{\sigma}'_c + \bar{\sigma}'_c \left[1 + \frac{c - t_f}{c} \right] \frac{(b_f - b_w) t_f}{2} + A'_s \sigma'_s \right]$$

ب. شرط توازن العزوم:

$$M = C_w z_w + C_f z_f + C' z'$$

$$M = C_w z_w + C_f z_f + A'_s \sigma'_s (d - d')$$

$$A'_s = \frac{[M - C_w z_w - C_f z_f]}{\sigma'_s (d - d')} \quad (22-8)$$

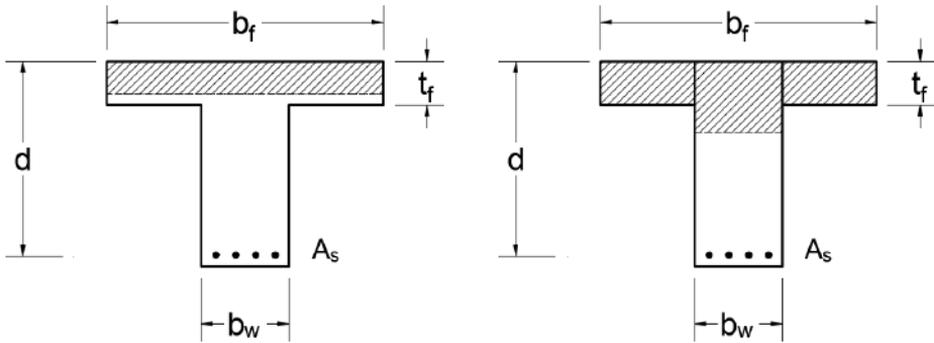
قد يحدث أن تعطي هذه المعادلة قيمة سالبة وهذا يدل على أن المقطع لا يحتاج إلى تسليح ضغط. بتعبير آخر: إنَّ المقطع يكون كافياً وعندها يُسلِّح المقطع على الشد فقط وتساوي مساحة تسليح الشد إلى:

$$A_s = \frac{1}{\bar{\sigma}_s} \left[\frac{1}{2} b_w c \bar{\sigma}'_c + \bar{\sigma}'_c \left[1 + \frac{c - t_f}{c} \right] \frac{(b_f - b_w) t_f}{2} \right] \quad (23-8)$$

إنَّ هذه الطريقة هي طريقة دقيقة وتُعطي مساحات التسليح دون إهمال أو تقريب. ولكن من الجدير بالذكر أنه في كثير من الأحيان يمكن إهمال البيتون الموجود في الجذع لصغر مساحته من جهة ولصغر قيمة الإجهادات فيه من جهة أخرى بسبب القرب من المحور المحايد.

8-11-3 تدقيق الإجهادات في المقاطع بشكل T:

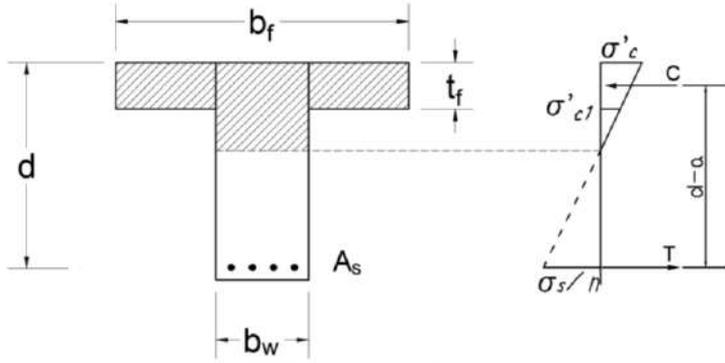
عند حساب الإجهادات يتمُّ التمييز بين حالتين، حالة وقوع المحور المحايد ضمن الجذع وحالة وقوع المحور المحايد ضمن الجناح.



الشكل (8-10) موقع المحور المحايد من أجل المقطع T

بفرض وقوع المحور المحايد ضمن الجذع يتمُّ حساب الإجهادات في كل من الفولاذ المشدود

والبيتون:



الشكل (11-8) الإجهادات على المقطع T عندما المحور ال

بإهمال البيتون المضغوط الكائن في الجذع تحت البلاطة (الجناح) تكون محصلة القوى الضاغطة في البيتون:

$$C = b_f t_f \frac{(\sigma'_c + \sigma'_{cl})}{2}$$

$$\sigma'_{cl} = \sigma'_c \frac{c - t_f}{c}$$

حيث:

فيكون:

$$C = b_f t_f \frac{\left(\sigma'_c + \sigma'_c \frac{c - t_f}{c} \right)}{2} = b_f t_f \sigma'_c \left(1 - \frac{t_f}{2c} \right)$$

قوة الشد في الفولاذ المشدود:

$$T = A_s \sigma_s$$

بتطبيق توازن القوى:

$$T = C$$

$$A_s \sigma_s = b_f t_f \sigma'_c \left(1 - \frac{t_f}{2c} \right)$$

$$\frac{\sigma_s}{\sigma'_c} = \frac{b_f t_f}{A_s} \left(1 - \frac{t_f}{2c} \right)$$

إنَّ قيمة البعد النسبي للمحور المحايد تساوي إلى:

$$\alpha = \frac{n}{n + \frac{\sigma_s}{\sigma'_c}}$$

بتعويض نسبة إجهاد الفولاذ إلى إجهاد الببتون:

$$\alpha = \frac{n}{n + \frac{b_f t_f}{A_s} \left(1 - \frac{t_f}{2c}\right)}$$

بالإصلاح:

$$\alpha = \frac{n + \frac{b_f t_f^2}{2A_s d}}{n + \frac{b_f t_f}{A_s}}$$

بما أن: $\mu_s = \frac{A_s}{b_f d}$

$$\alpha = \frac{n\mu_s + \frac{1}{2} \left(\frac{t_f}{d}\right)^2}{n\mu_s + \frac{t_f}{d}}$$

نعلم أن:

$$\varepsilon = z/d$$

$$z = d - a$$

$$a = \frac{t_f}{3} \frac{3c - 2t_f}{2c - t_f} \quad (24-8)$$

بعد حساب كل من النسب α, ε يمكن تدقيق الإجهادات في كل من الفولاذ والببتون:

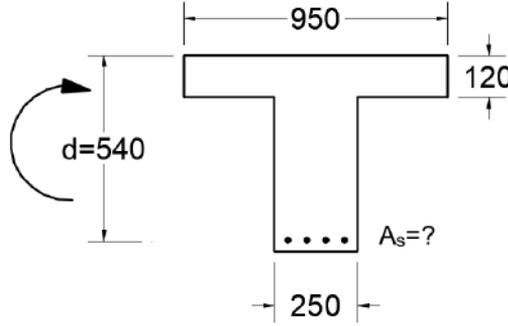
$$\sigma_s = \frac{M}{\varepsilon d A_s} \quad (25-8)$$

$$\sigma'_c = \frac{\sigma_s}{n} \frac{c}{(d - c)} = \frac{\sigma_s}{n} \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} \quad (26-8)$$

مثال تطبيقي (8-8):

مقطع من البيتون المسلح بشكل T أبعاده مبينة بالشكل، يخضع إلى عزم انعطاف قدره

$$M=160\text{kN.m} \quad \text{صمم المقطع علماً أنّ مواصفات المواد: } f'_c = 20\text{MPa} \quad f_y = 280\text{MPa}$$



الحل:

سيتمّ اتباع الطريقة التقريبية:

• الإجهادات المسموحة:

$B_0/t_f = 2.9$ نعتمد الإجهاد المسموح في البيتون:

$$\bar{\sigma}'_c = 0.45f'_c = 9\text{MPa}$$

$$\bar{\sigma}_s = 0.55f_y = 154\text{MPa}$$

• تسليح الشد:

$$A_s = \frac{M}{\bar{\sigma}_s z}$$

$$z = d - t_f / 2 = 540 - 60 = 480\text{mm}$$

$$A_s = \frac{M}{\bar{\sigma}_s z} = \frac{160 \times 10^6}{154 \times 480} = 2164.5\text{mm}^2$$

• تدقيق الإجهاد الأقصى في البيتون:

$$\sigma'_c = \bar{\sigma}'_c / n \left[\left(1 + \frac{nA_s}{b_f t_f} \right) \left(\frac{d}{d - t_f / 2} \right) - 1 \right]$$

$$= 154 / 15 \left[\left(1 + \frac{15 \times 2164.5}{950 \times 120} \right) \left(\frac{540}{540 - 120 / 2} \right) - 1 \right] = 4.57\text{MPa} < 9\text{MPa}$$

هذا يعني أن المقطع مقبول، ويمكن الاكتفاء بتسليح الشد.

مثال تطبيقي (8-8):

أعد حل المسألة السابقة باعتبار المقطع معرض إلى عزم قدره $M=420\text{kN.m}$:

الحل:

• الإجهادات المسموحة:

$$\bar{\sigma}_s = 0.55f_y = 154\text{MPa} \quad \bar{\sigma}'_c = 0.45f'_c = 9\text{MPa}$$

• تسليح الشد:

$$A_s = \frac{M}{\bar{\sigma}_s z}$$

$$z = d - t_f / 2 = 540 - 60 = 480\text{mm}$$

$$A_s = \frac{M}{\bar{\sigma}_s z} = \frac{420 \times 10^6}{154 \times 480} = 5681.82\text{mm}^2$$

• تدقيق الإجهاد الأقصى في البيتون:

$$\sigma'_c = \bar{\sigma}'_c / n \left[\left(1 + \frac{nA_s}{b_f t_f} \right) \left(\frac{d}{d - t_f / 2} \right) - 1 \right]$$

$$= 154 / 15 \left[\left(1 + \frac{15 \times 5681.82}{950 \times 120} \right) \left(\frac{540}{540 - 120 / 2} \right) - 1 \right] = 9.92\text{MPa} > 9\text{MPa}$$

والمقطع بحاجة إلى تسليح ضغط: تتم المتابعة بالطريقة الدقيقة بحساب القوى:

• قوة الضغط في الجذع:

$$C_w = \frac{1}{2} b_w c \bar{\sigma}'_c$$

$$c = \frac{n}{n + \frac{\bar{\sigma}_s}{\bar{\sigma}'_c}} d = \frac{15}{15 + \frac{154}{9}} 540 = 252.25\text{mm}$$

$$C_w = \frac{1}{2} b_w c \bar{\sigma}'_c = \frac{1}{2} 250 \times 252.25 \times 9 = 283.78 \times 10^3 \text{ N}$$

يقع مركز ثقل القوة C_w على مسافة قدرها $c/3$ من الليف العلوي. وذراع الرافعة لهذه القوة هو:

$$z_w = \varepsilon d = (1 - \alpha/3)d$$

$$\alpha = \frac{n}{n + \frac{\sigma_s}{\sigma_c}} = 0.467 \quad \varepsilon = 1 - \alpha/3 = 0.844$$

$$z_w = \varepsilon d = 455.92 \text{ mm}$$

• قوة الضغط في الجناح:

$$C_f = \bar{\sigma}_c (b_f - b_w) t_f \left[1 - \frac{t_f}{2c} \right] = 9(950 - 250) t_f \left[1 - \frac{120}{2 \times 252.25} \right] = 576.18 \times 10^6 \text{ N}$$

تؤثر هذه القوة في مركز ثقل شبه المنحرف لمخطط الإجهادات في الجناح ويرمز إلى البعد بين مركز الثقل والليف العلوي بالرمز a ويُعطى بحسب خواص شبه المنحرف:

$$a = (b_f - b_w) t_f \left[1 - \frac{t_f}{2c} \right] = (950 - 250) 120 \left[1 - \frac{120}{2 \times 252.25} \right] = 53.76 \text{ mm}$$

ويكون ذراع الرافعة في هذه القوة:

$$z_f = d - a = 486.24 \text{ mm}$$

• قوة الضغط في الفولاذ المضغوط:

$$C' = A'_s \sigma'_s$$

حيث يكون إجهاد الضغط في الفولاذ المضغوط:

$$\sigma'_s = n \bar{\sigma}_c \frac{c - d'}{c} = 15 \times 9 \frac{252.25 - 60}{252.25} = 102.89$$

ويكون ذراع الرافعة لهذه القوة:

$$z' = d - d' = 480$$

شرط توازن العزوم:

$$M = C_w z_w + C_f z_f + C' z'$$

$$M = C_w z_w + C_f z_f + A'_s \sigma'_s (d - d')$$

$$A'_s = \frac{[M - C_w z_w - C_f z_f]}{\sigma'_s (d - d')} = \frac{[420 \times 10^3 - 283.78 \times 455.92 - 576.18 \times 486.24]}{102.89 \times 480} 10^3 = 211.76 \text{mm}^2$$

$$C' = A'_s \sigma'_s = 21.79 \times 10^3 \text{ N}$$

$$T = A_s \bar{\sigma}_s \quad \bullet \quad \text{قوة الشد في الفولاذ المشدود:}$$

شرط توازن القوى المحورية:

$$T = C_w + C_f + C'$$

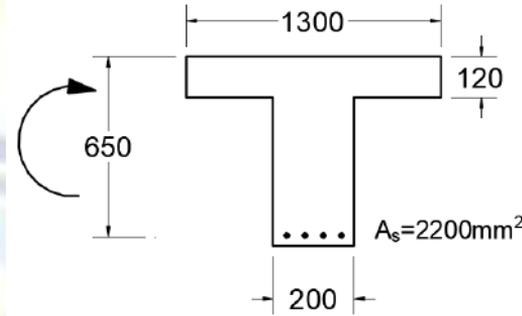
$$T = [283.78 + 576.18 + 21.79] 10^3 = 881.75 \times 10^3 \text{ N}$$

$$A_s = T / \bar{\sigma}_s = 5725.62 \text{mm}^2$$

مثال تطبيقي (8-9):

مقطع من البيتون المسلح بشكل T أبعاده مبينة بالشكل، يخضع إلى عزم انعطاف قدره

$M = 200 \text{ kN.m}$ قم بتدقيق الإجهادات علماً أن مواصفات المواد: $f'_c = 20 \text{ MPa}$ $f_y = 300 \text{ MPa}$



الحل:

• الإجهادات المسموحة:

$B_0/t_f = 4.58$ نعتمد الإجهاد المسموح في البيتون:

$$\bar{\sigma}'_c = 0.45 f'_c = 9 \text{ MPa}$$

$$\bar{\sigma}_s = 0.55 f_y = 165 \text{ MPa}$$

• الارتفاع النسبي للمحور المحايد:

$$\alpha = \frac{n\mu_s + \frac{1}{2}\left(\frac{t_f}{d}\right)^2}{n\mu_s + \frac{t_f}{d}}$$

$$\mu_s = \frac{A_s}{b_f d} = 0.0026, n\mu_s = 0.0391$$

$$\alpha = \frac{n\mu_s + \frac{1}{2}\left(\frac{t_f}{d}\right)^2}{n\mu_s + \frac{t_f}{d}} = \frac{0.0391 + \frac{1}{2}\left(\frac{120}{650}\right)^2}{0.0391 + \frac{120}{650}} = 0.2508$$

$$c = \alpha \cdot d = 0.2508 \times 650 = 163 \text{ mm} > t_f = 120 \text{ mm}$$

والمحور المحايد يقطع الجذع.

• ذراع الرافعة z:

$$z = d - a$$

$$a = \frac{t_f}{3} \frac{3c - 2t_f}{2c - t_f} = \frac{120}{3} \frac{3 \times 163 - 2 \times 120}{2 \times 163 - 120} = 48.35 \text{ mm}$$

$$z = d - a = 601.65 \text{ mm}$$

تدقيق الإجهادات في كل من الفولاذ والبيتون:

$$\sigma_s = \frac{M}{z \cdot A_s} = \frac{200 \times 10^6}{601.65 \times 2200} = 151.1 < \bar{\sigma}_s$$

الفصل التاسع

تحليل وتصميم الجيزان من البيتون المسلح

Analysis and Design of R/C Beams

1-9 الأنظمة الستاتيكية للجيزان من البيتون المسلح Satical Systems of R/C Beams

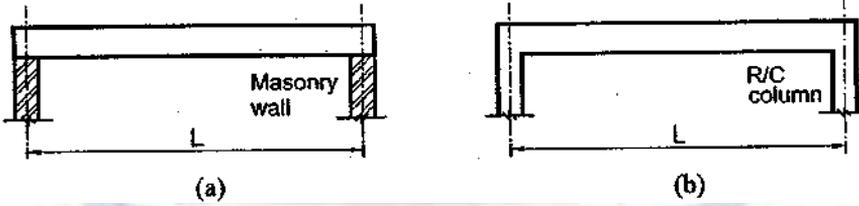
تصنف الجيزان بحسب شروط الاستناد إلى جيزان بسيطة الاستناد وجيزان بسيطة ذات أظفار

وجيزان مستمرة:

• جيزان بسيطة الاستناد: وتصنف إلى نوعين بحسب نوع الاستناد:

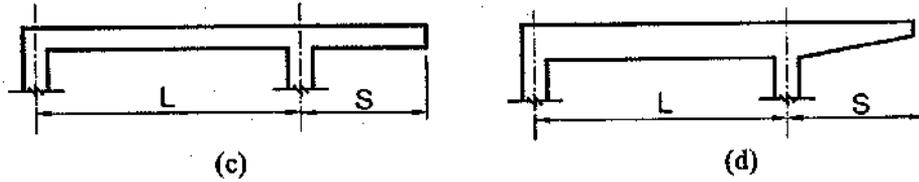
○ جيزان مصبوبة في نفس الوقت مع الأعمدة Monolithically Casted

○ جيزان مستندة إلى جدران حجرية Masonry Walls



الشكل (1-9) استنادات الجيزان

• جيزان بسيطة ذات أظفار:

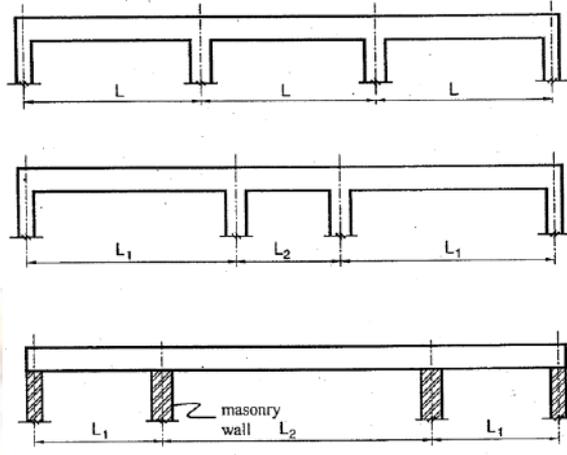


الشكل (2-9) جيزان بسيطة ذات أظفار

• جيزان مستمرة:

○ جيزان مصبوبة في نفس الوقت مع الأعمدة Monolithically Casted

○ جيزان مستدة إلى جدران حجرية Masonry Walls



الشكل (3-9) جيزان مستمرة

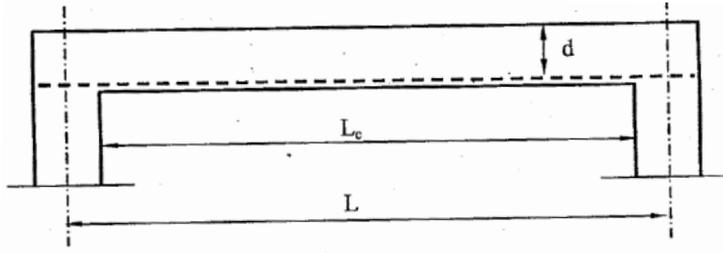
2-9-2 المجاز الفعال Effective Span

يسمى المجاز المستخدم في حساب التسليح في الجيزان البيتونية بالمجاز الفعال L_{eff} حيث تحسب قيمته بحسب الجائز كما يلي:

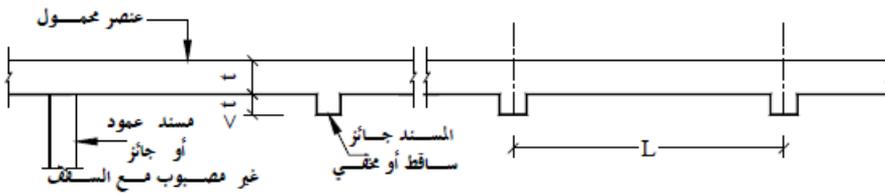
1-2-9-2 المسند مصبوب بشكل مستمر Monolithically Casted مع الجائز (سواءً كان المسند عمود أو جدار أو جائز رئيسي):

عندما يكون المسند مصبوب بشكل مستمر مع الجائز المحمول ولا يقل ارتفاع المسند عن مثلي الجائز المحمول يؤخذ المجاز الفعال مساوياً إلى القيمة الأدنى بين القيم التالية:

- المسافة بين محوري المسندين للمجاز المدرس (L)
- المسافة الحرة بين المسندين مضروبة بالعامل 1.05 ($1.05L_0$)
- المسافة الحرة بين المسندين مضافاً إليها العمق الفعال للجائز d (L_0+d)



الشكل (4-9) الارتفاع الفعال



الشكل (5-9) المسند جائز مخفي أو غير مصبوب مع السقف

2-2-9 المسند عمود أو جدار حجري Masonry Support

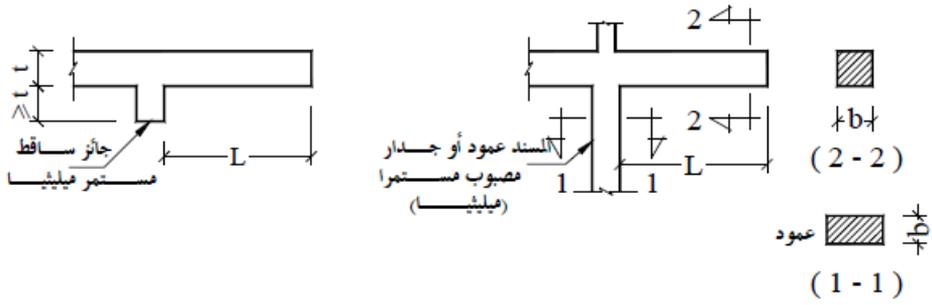
عندما يكون المسند مصبوب بشكل مستمر مع الجائز المحمول وارتفاع المسند يقل عن مثلي ارتفاع العنصر المحمول، يؤخذ المجاز الفعال مساوياً إلى المسافة المحورية بين المسندين L .

3-2-9 الجائز الظفري:

- المسند مصبوب بشكل مستمر مع العنصر:
 - المسند عمود أو جدار عرضه من نفس عرض الظفر.
 - المسند جائز ارتفاعه لا يقل عن مثلي ارتفاع الظفر.

$$L_{eff} = L_0 \quad \text{يكون:}$$

حيث: L_0 هو المجاز من الطرف الحر حتى وجه المسند.

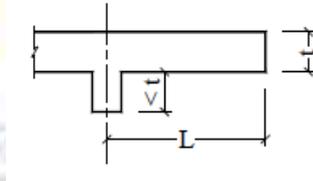


الشكل (6-9) الجائز الظفري

- المسند جائز مصبوب بشكل مستمر مع العنصر ويقل ارتفاعه عن مثلي ارتفاع الظفر.

$$L_{eff} = L \quad \text{يكون:}$$

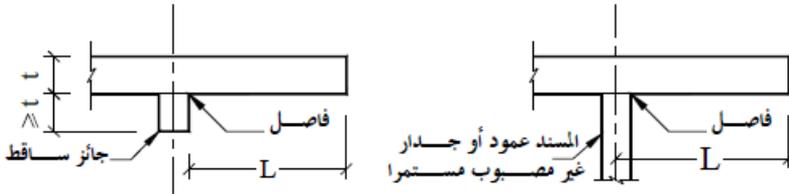
حيث: L هو المجاز من الطرف الحر حتى محور المسند.



الشكل (7-9) جائز ظفري مستند إلى جائز ارتفاعه أقل من سماكة الجائز

- المسند عمود أو جدار أوجائز حجري (غير مصبوب بشكل مستمر مع الظفر).

$$L_{eff} = L \quad \text{يكون:}$$



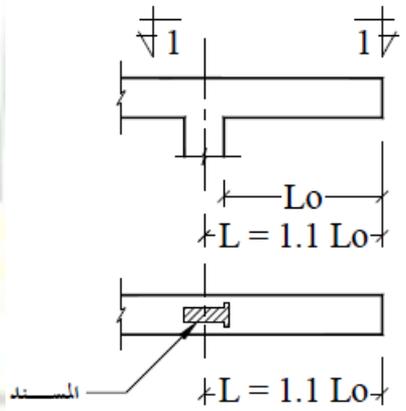
الشكل (8-9) جائز ظفري مستند إلى عنصر غير مصبوب بشكل مستمر مع الظفر

- المسند عمود مصبوب بشكل مستمر مع الظفر وعرض العمود بالاتجاه المتعامد مع مجاز الظفر أقل من 0.7 من عرض عرض الظفر:

$$L_{eff} = 1.1L_0 \quad \text{يكون:}$$

ملاحظة: يمكن بغية تسهيل الحسابات اعتبار المجاز الحسابي الفعال هو المجاز بين محاور الاستناد عندما يكون عرض الاستناد صغيراً بالنسبة إلى المجاز.

$$b_s < 0.07L \Rightarrow L_{eff} = L$$



الشكل (9-9) جائز ظفري مستند إلى عنصر ذو عرض صغير

3-9 ارتفاع الجائز h (Beam Height)

قد يكون ارتفاع الجائز محدداً سلفاً من قبل المهندس المعماري ويُطلب الالتزام به (من أجل توفير شروط الإنارة مثلاً)، ولكن في معظم الأحيان لا يكون ارتفاع الجائز محدداً، ولذلك يتم البدء بإعطاء قيمة أولية تقديرية له ويجري على أساسها تقدير الوزن الذاتي.

يؤخذ ارتفاع المقطع h استناداً إلى شرط السهم (الانحناء) حيث يُعطى في الكود العربي السوري بحسب الجدولين التاليين، من أجل الجيزان التي لا تزيد مجازاتها عن 15m، بينما في حالة الجيزان التي تزيد مجازاتها على 15m فلا بد من حساب السهم الفعلي ومقارنته بالسهم المسموح حتى لو تحققت القيم الواردة في الجداول.

- الارتفاع الأدنى المسموح به في الجيزان التي لا تقل مقاومتها المميزة عن 20MPa

الجدول (1-9) شرط السهم في الجيزان ذات المقاومة المميزة أكبر من 20MPa

نوع الجيزان / الاستناد	غير مستمر من الطرفين	مستمر من طرف واحد	مستمر من طرفين	ظرفية
بارزة	$\frac{L}{14}$	$\frac{L}{15}$	$\frac{L}{16}$	$\frac{L}{6}$
مخفية	$\frac{L}{16}$	$\frac{L}{18}$	$\frac{L}{20}$	$\frac{L}{8}$

- الارتفاع الأدنى المسموح به في الجيزان التي تقل مقاومتها المميزة عن 20MPa

الجدول (2-9) شرط السهم في الجيزان ذات المقاومة المميزة أقل من 20MPa

نوع الجيزان / الاستناد	غير مستمر من الطرفين	مستمر من طرف واحد	مستمر من طرفين	ظرفية
بارزة	$\frac{L}{12}$	$\frac{L}{13}$	$\frac{L}{14}$	$\frac{L}{6}$
مخفية	$\frac{L}{14}$	$\frac{L}{16}$	$\frac{L}{18}$	$\frac{L}{8}$

يُلاحظ من الجداول أنّ السماكة تنقص عندما يكون الجائز مستمراً من طرف أو مستمراً من الطرفين ويعود ذلك؛ إلى نقصان السهم (الانحناء) بسبب الاستمرارية. يؤخذ مقطع الجيزان المستمرة ثابتاً في جميع المجازات إلا إذا دعت الضرورة لغير ذلك.

يجب أن يكون الارتفاع مدوراً إلى أقرب 5cm وللرقم الأكبر وذلك لأسباب عملية، وفي كل الأحوال لا يقل عن 30cm.

9-4 عرض الجائز (Beam Breadth) b

لا يقل عرض المقطع عن 20cm، ويتراوح عادة بين نصف وثلث الارتفاع $\frac{h}{3} \rightarrow \frac{h}{2}$ ، ويكون

أيضاً مدوراً لأقرب 5cm. ولا يفضل أن يزيد عرض الجائز عن عرض العمود إلا في حالات مفروضة معمارياً.

5-9 الحمولات المطبقة على الجيزان Loads Acting on Beams

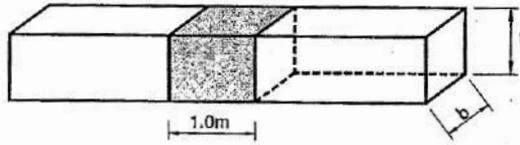
تؤثر الحمولات التالية على جيزان البيتون المسلح:

- الوزن الذاتي للجائز .
- الحمولات المنقولة من البلاطات إلى الجيزان الحاملة لها.
- حمولات الجدران.
- أية حمولات أخرى يمكن أن تنتقل إلى الجائز مثل أحمال الجيزان الثانوية.

حيث تُعدُّ حمولة البلاطات المنقولة إلى الجائز وحمولة الجيزان الثانوية أحمال غير مباشرة، بينما تُعدُّ حمولة الوزن الذاتي للجائز وحمولة الجدار فوقه أحمالاً مباشرة.

1-5-9 الوزن الذاتي للجائز Beam's Self Weight

يحسب الوزن الذاتي للجائز عادة في المتر الطولي كما هو مبين بالشكل:



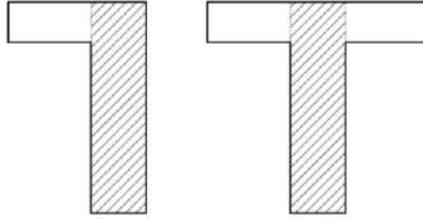
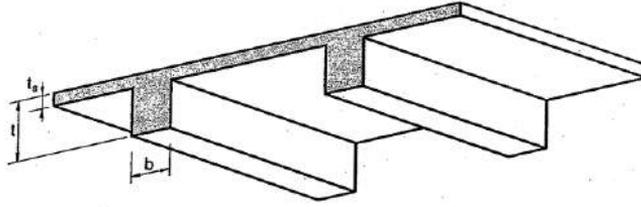
الشكل (9-10) حساب الوزن الذاتي للجائز

$$g = b \times h \times \gamma_c \quad (1-9)$$

b, h : ارتفاع الجائز وعرضه.

γ_c : كثافة مادة البيتون المسلح وتتراوح بين $25kN/m^3 \rightarrow 23.5$

بالنسبة للجيزان الحاملة لبلاطات مليئة، فإنَّ جزءاً من البلاطة يعمل على زيادة صلابة الجائز فيكون مقطع الجائز الفعال بشكل T أو L كما هو مبين بالشكل، ولكن في حساب الوزن الذاتي للجائز لا يتمُّ حساب هذا الجزء؛ لأنَّه محسوب مع الوزن الذاتي للبلاطة، فيحسب الوزن الذاتي للمقطع المستطيل للجائز فقط.



الشكل (9-11) الجيزان ذات المقطع T

9-5-2 حمولات البلاطات Slab Loads

تكون حمولات البلاطات بالمتر المربع (kN/m^2) وتتألف من حمولة ميتة وحمولة حية.

- الحمولة الميتة g (Dead Load) وهي حمولات دائمة (ثابتة مع الزمن).
تتكوّن الحمولة الميتة في البلاطة من وزنها الذاتي Self Weight وحمولة الإكساء والتغطية فوقها Flooring, Covering

$$SW = h_s \times \gamma_c \text{ الوزن الذاتي } \circ$$

- الإكساء والتغطية تحسب من أجل طبقات الإكساء من رمل ومونة وبلاط ومواد عزل

$$Flooring = \sum h_i \times \gamma_i \text{ وتمديدات تدفئة مركزية}$$

ويمكن للسهولة اعتبار القيم التالية:

2.00 kN/m^2 في حال عدم وجود تمديدات تدفئة مركزية.

3.00 kN/m^2 في حال عدم تمديدات تدفئة مركزية.

ويكون الحمل الميت للبلاطة كاملاً:

$$g_s = h_s \times \gamma_c + Flooring \quad (2-9)$$

تُعطى الحمولة الحية في الكود السوري بحسب استخدام المنشأ وتتراوح بين $2-6\text{kN/m}^2$ عادة، وتمثل الأوزان المتحركة والحمولات غير الدائمة مثل الأثاث والسكان والبضائع الجاهزة.

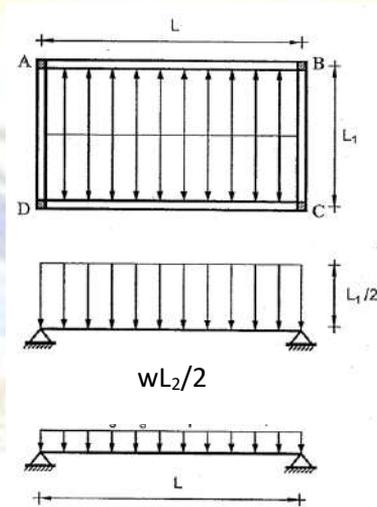
9-6 نقل أحمال البلاطات المليئة إلى الجيزان:

في الحالات التي تكون فيها البلاطة مسنودة من أطرافها الأربعة ونسبة طول البلاطة إلى عرضها أكبر من $2/$ تماماً، يكون الاتجاه الأقصر للبلاطة أصعب من الاتجاه الأطول، وفي هذه الحالة يكون الحمل منقولاً عبر الاتجاه الأقصر، وتتصرف البلاطة كبلاطة عاملة باتجاه وحيد One-way slab كما في الشكل، وبالتالي الجيزان AB,CD الموازية للاتجاه الطويل تحمل كامل حمل البلاطة.

تسمى نسبة طول البلاطة إلى عرضها (عامل الاستطالة) أو نسبة الاستطالة Rectangularity Ratio

$$\rho = \frac{L_1}{L_2} \quad (3-9)$$

L_1 : البعد الطويل للبلاطة (المجاز الفعال)، L_2 : البعد القصير للبلاطة (المجاز الفعال).

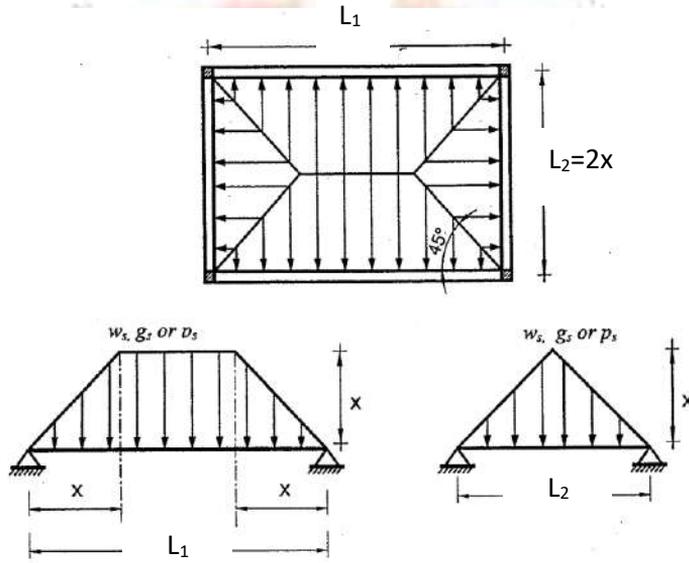


الشكل (9-12) انتقال أحمال البلاطة ذات الاتجاه الوحيد

في الحالات التي تكون فيها البلاطة مسنودة على جيزان من أطرافها الأربعة وتكون نسبة الاستطالة أصغر أو تساوي 2:

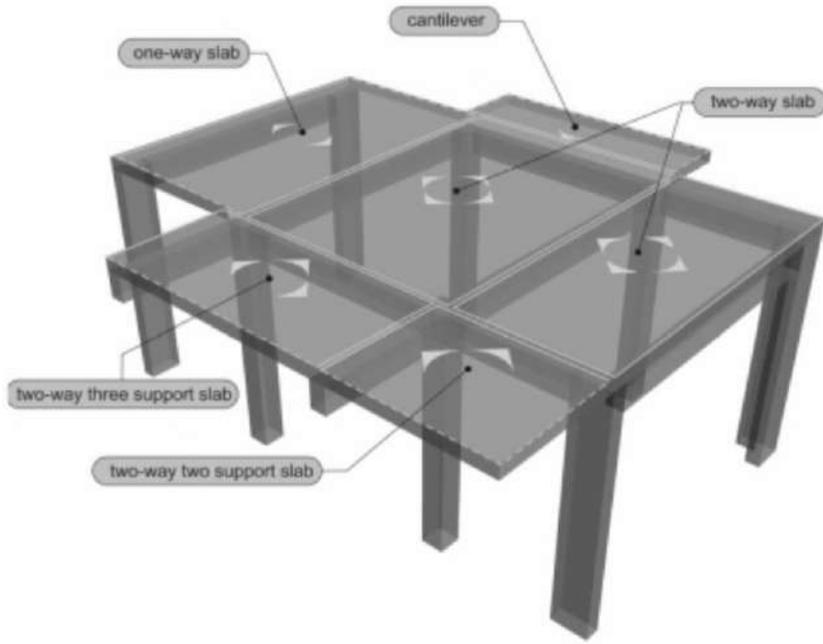
$$\rho = \frac{L_1}{L_2} \leq 2 \quad (4-9)$$

تنتقل الحمولة وفق الاتجاهين القصير والطويل، ويحمل كل من الجيزان الأربعة جزءاً من الحمولة، وتسمى البلاطة في هذه الحالة Two-way slab بلاطة تعمل باتجاهين. توزع الحمولات بين الجيزان الأربعة وفقاً لخطوط الانكسار وذلك وفق مستقيم يميل بزاوية 45^0 عن الزوايا الأربعة وبالتالي تكون الحمولات بشكل مثلثي أو شبه منحرف كما في الشكل.



الشكل (13-9) انتقال أحمال البلاطة ذات الاتجاهين

في الحالات التي لا تتوفر فيها جيزان في الأطراف الأربعة للبلاطة كما في الشكل (14-9)، فإن الحمل ينتقل إلى الجيزان الموجودة، مثلاً في حال وجود جائزين متقابلين فقط فإن كل منهما يحمل نصف حمولة البلاطة فتعمل البلاطة باتجاه وحيد حتى لو كانت نسبة الاستطالة أقل من $2/1$. في حال كون نسبة الاستطالة أقل من $2/1$ ، ويوجد ثلاثة جيزان فقط لتحمل البلاطة فإن أحدها يحمل حمولة مثلثية بزاوية 45^0 والجائزين المتقابلين يحملان حمولة شبه منحرفة (مثلث ومستطيل)، الشكل (14-9).



الشكل (9-14) انتقال أحمال البلاطات، مرجع رقم (10)

9-6-1 تأثير الاستمرارية على نسبة الاستطالة:

في حال كانت البلاطة مستمرة من أطرافها الأربعة أو بعضها (وجود بلاطات بجوار البلاطة المدروسة) فإنَّ نسبة الاستطالة تتغير حيث تأخذ القيمة المبينة في المعادلة:

$$r = \frac{m_1 L_1}{m_2 L_2} \leq 2 \quad (5-9)$$

L_1 : البعد الطويل للبلاطة (مجاز فعّال).

L_2 : البعد القصير للبلاطة (مجاز فعّال).

m_1 : معامل الاستمرارية وفق الاتجاه الطويل.

m_2 : معامل الاستمرارية وفق الاتجاه القصير.

حيث تأخذ m_1 ، m_2 القيم الموضحة في الشكل التالي وتمثل نسبة المسافة بين نقاط انعطاف الشكل المتشوه Inflection Points (وهي ذاتها نقاط انعدام العزم) إلى الطول الكلي للمجاز .



الشكل (9-15) نسبة المسافة بين نقطتي انعدام العزم إلى طول المجاز

2-6-9-9 مكافأة الحمولة المثلثية والحمولة شبه المنحرفة Triangle and Trapezoidal Loads

يمكن استبدال الحمولة المثلثية والحمولة شبه المنحرفة بحمولة مكافئة موزعة بانتظام على كامل طول المجاز - عدا الجيزان الظرفية - على أن تحقق الحمولة المكافئة نفس الجهود التي تعطيها الحمولة المثلثية أو شبه المنحرفة.

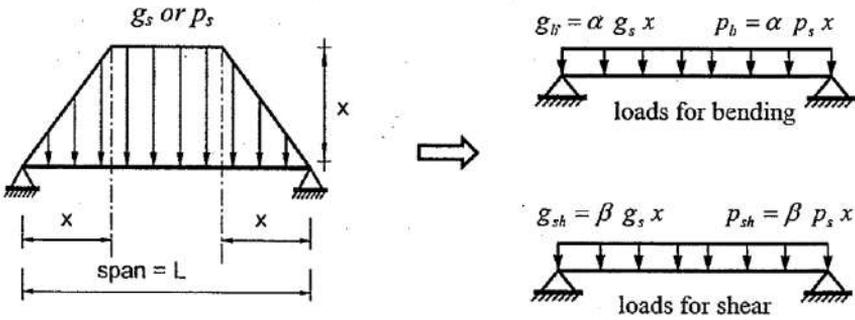
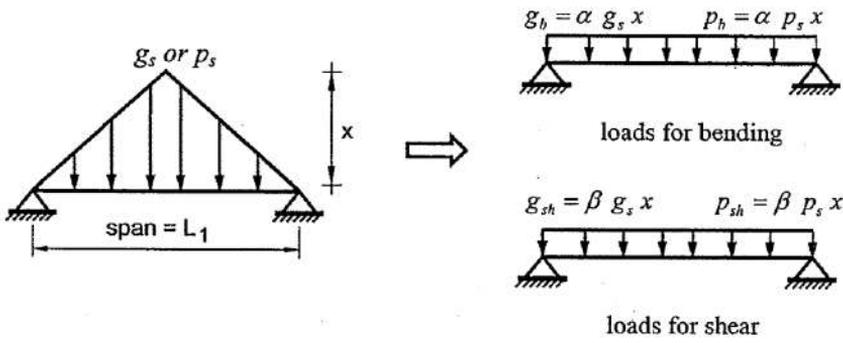
وتكون الحمولة الموزعة المكافئة من أجل الجهد القاطع (القص) مقدرة بوحدة kN/m:

$$w_{\beta} = \beta \times w_s$$

حيث تُعطي نفس القيمة العظمى للجهد القاطع التي تعطيها الحمولة المثلثية أو شبه المنحرفة. بينما تكون الحمولة الموزعة المكافئة من أجل عزم الانعطاف:

$$w_{\alpha} = \alpha \times w_s$$

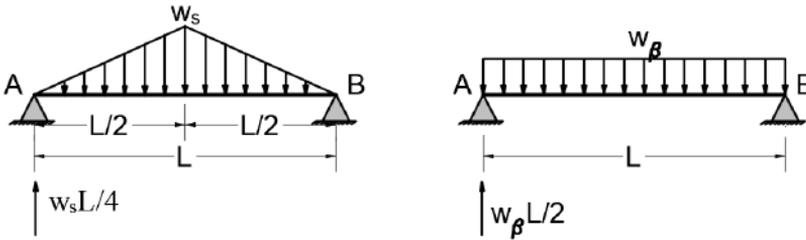
حيث تُعطي نفس القيمة العظمى لعزم الانعطاف التي تعطيها الحمولة المثلثية أو شبه المنحرفة.



الشكل (9-16) الحمولة الموزعة المكافئة للحمولة المثلثية أو شبه المنحرفة، مرجع رقم (8)

لنبرهن على ذلك من أجل جائر بسيط يحمل حمولة مثلثية:

- إنَّ قوة القص العظمى في حالة جائر بسيط يحمل حمولة مثلثية عند المسند تساوي $w_s L/4$ بالمساواة مع قوة القص العظمى في حالة حمولة موزعة بانتظام مكافئة:



الشكل (9-17) الحمولة الموزعة المكافئة للحمولة المثلثية من أجل حساب القوة القاطعة

$$\frac{w_s}{4} L = \frac{w_\beta L}{2} = \frac{\beta w_s L}{2} \Rightarrow \beta = \frac{1}{2}$$

- إنَّ عزم الانعطاف الأعظمي في وسط المجاز من أجل حمولة مثلثية يساوي $w_s L^2/12$ بالمساواة مع عزم الانعطاف الأعظمي وسط المجاز من أجل حمولة موزعة مكافئة:

$$\frac{w_s}{8} L^2 = \frac{w_\alpha L^2}{12} = \frac{\alpha w_s L^2}{12} \Rightarrow \alpha = \frac{2}{3}$$

- يمكن بسهولة البرهان على أنه من أجل حمولة شبه منحرفة Trapezoidal Load تكون معاملات مكافأة الحمولة كما يلي:

$$\alpha = 1 - \frac{1}{3\rho^2} \quad \beta = 1 - \frac{1}{2\rho}$$

حيث $\rho = \frac{L_1}{L_2}$ ، L_1 : البعد الطويل للبلاطة.

تُعطى معاملات مكافأة الحمولة بالجدول (3-9) من أجل قيم مختلفة للمعامل ρ :

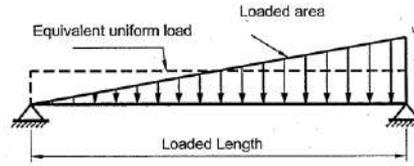
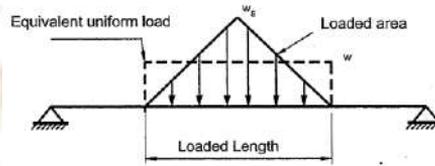
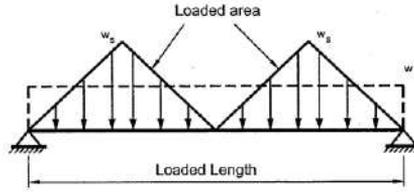
الجدول (3-9) معاملات مكافأة الحمولة

$\rho = \frac{L_1}{L_2}$	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
α	0.667	0.725	0.769	0.803	0.829	0.852	0.87	0.885	0.897	0.908	0.917
β	0.5	0.545	0.583	0.615	0.643	0.667	0.688	0.706	0.722	0.737	0.75
الحمولة	مثلثية	شبه منحرفة									

ملاحظة: من أجل حالات التحميل المختلفة على جائر بسيط والتي لا يصح تطبيق العوامل السابقة عليها، يمكن تقريب الحمولات المثلثية إلى حمولات موزعة بانتظام مكافئة من أجل حساب الجهد القاطع وعزم الانعطاف حيث تعطى شدة هذه الحمولة بالمعادلة التالية:

$$w_e = w_s \times (\text{المساحة المحملة} / \text{الطول المحمل})$$

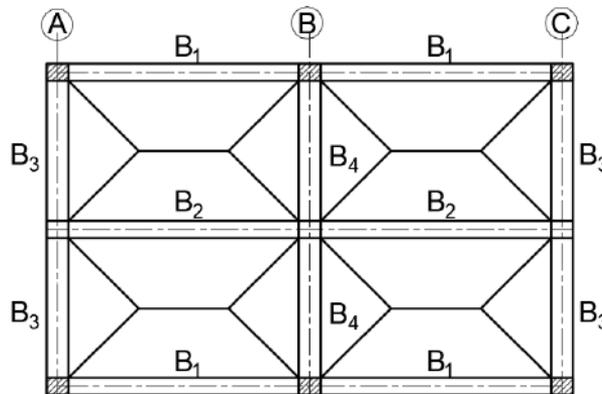
الأشكال التالية توضح أمثلة على مكافأة الحمولات المثلثية بحمولة موزعة بانتظام وفق هذه القاعدة.



الشكل (9-18) الطريقة التقريبية لحساب الحمولة المكافئة، مرجع رقم (8)

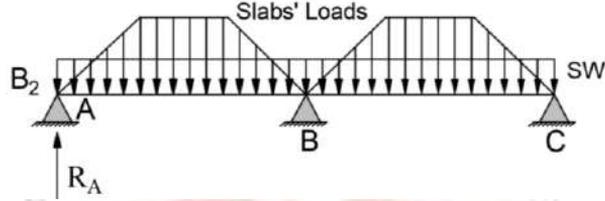
9-6-3 ردود أفعال الجيزان الثانوية:

عندما يعمل جائر بوصفه مسنداً لجائر آخر (بسبب عدم وجود أعمدة) يؤخذ رد الفعل في الجائر المحمول على أنه حمولة مركزة في الجائر الحامل.



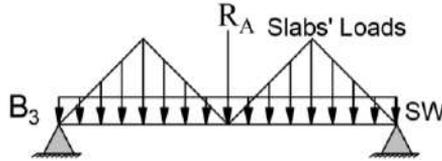
الشكل (9-19) مسقط بلاطات مليئة

B_1, B_3 : جأز رءس مأمول على أعمدة.
 B_2 : جأز ثانوي مأمول على جأز آخ.
وتكون الحمولات على الجأز الثانوي B_2 :



الشكل (9-20) حمولات الجأز الثانوي B_2

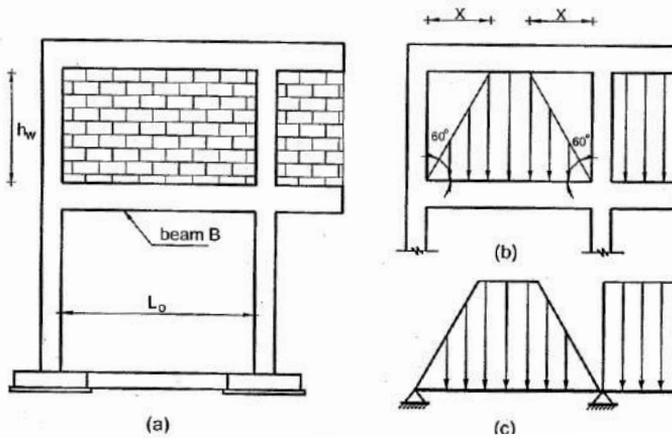
والحمولات على الجأز الرءس B_3 :



الشكل (9-21) حمولات الجأز الرءسي B_3

4-6-9 حمولات الجدران Wall Loads

عندما تكون الجدران مأمولة على الجيزان كما في الشكل تحصل الحالات الآتية:



الشكل (9-22) أأمال الجدران

• عندما يكون الجدار محصوراً بين عمودين فإنَّ الحمولة المحصورة بين زاويتين بمقدار 60° اعتباراً من العمود تولد عزوم انعطاف وجهد قاطع في الجائز الحامل وذلك بسبب الفعل القوسي للجدار.

• عندما يكون الجدار مستنداً إلى عمود واحد وحر من الطرف الآخر كما في حالة الظفر فإنَّ كامل حمولة الجدار تنتقل إلى الجائز بسبب حدوث الفعل القوسي Arching Action.

يمكن مكافأة الحمولة شبه المنحرفة في الحالة الأولى بحمولة موزعة بانتظام تعطي نفس القوى الداخلية العظمى حيث يتم الحصول على قيم α, β من الجدول من أجل $\rho = \frac{L_0}{2x}$ حيث:

$$x = h_w \tan 30^\circ \Rightarrow x = \frac{h_w}{\sqrt{3}}$$

وتكون حمولة الجدار: $g_w = \sum t_w \gamma_w$ لكامل طبقات الجدار. والحمولات المكافئة من أجل كل من القص والانعطاف:

$$g_{wsh} = \beta \times h_w \times g_w \quad g_{wcb} = \alpha \times h_w \times g_w$$

إنَّ كثافة مادة البلوك (الطبقة الأساسية في الجدار) تتراوح بين $12-20 \text{ kN/m}^3$ ، ويمكن افتراض وزن المونة (الطينة) بالمتر المربع مساوياً إلى $0.8-1 \text{ kN/m}^2$.

بسبب الفعل القوسي للجدار فإنَّ الجزء المثلي من حمولة الجدار محمول على العمود بينما يُحمل الجزء شبه المنحرف على الجائز، وبالتالي عند حساب الحمولات على العمود يجب إضافة الحمولة المثلية للجدار إلى حمولات العمود.

مثال عددي:

بفرض ارتفاع الجدار في الشكل السابق 2.4 m والبعد الصافي بين مسندي الجائز هو 5 m والوزن الذاتي للجدار هو $g_w = 4.75 \text{ kN/m}^2$ أوجد حمولة الجدار على فتحة الجائز وعلى الظفر.

$$\rho = \frac{L_0}{2x} = 1.8 \quad x = \frac{h_w}{\sqrt{3}} = \frac{2.4}{\sqrt{3}} = 1.39 \text{ m}$$

من الجدول: $\alpha = 0.897, \beta = 0.722$ وتكون حمولة الجدار من أجل حساب عزم الانعطاف.

$$g_{wb} = \alpha \times h_w \times g_w = 0.897 \times 4.75 \times 2.4 = 10.32 \text{ kN/m}$$

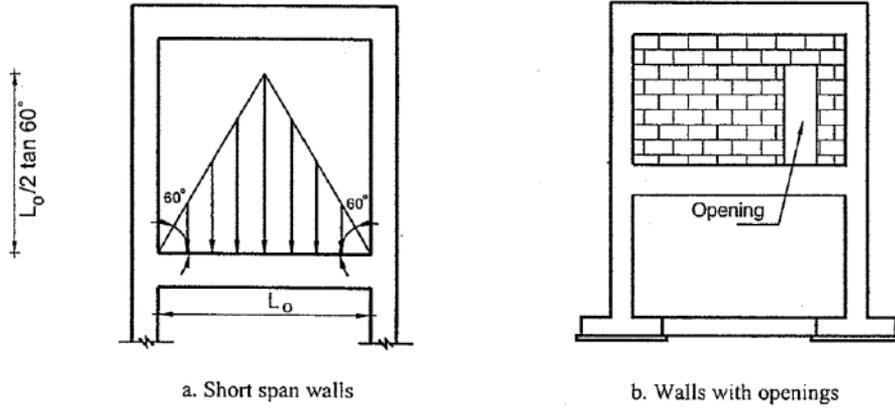
والحمولة من أجل الجهد القاطع:

$$g_{wsh} = \beta \times h_w \times g_w = 0.722 \times 4.75 \times 2.4 = 8.23 \text{ kN/m}$$

بينما تنتقل حمولة الجدار إلى الجائز الظفري بشكل كامل:

$$g_w = h_w \times g_w = 4.75 \times 2.4 = 11.4 \text{ kN/m}$$

ملاحظة (1): في حال كون المجاز L_0 صغير بحيث تكون الحمولة مثلثية وليست شبه منحرفة، كما في الشكل التالي، تكون الحمولة المكافئة كما يلي:



الشكل (9-23) أحمال الجدران في حالة المجازات الصغيرة أو الفتحات

$$w_{wb} = \frac{2}{3} \frac{L_0}{2tg30} g_w \quad w_{wsh} = \frac{1}{2} \frac{L_0}{2tg30} g_w$$

ملاحظة 2/: في حال وجود فتحات في الجدران لا يحدث الفعل القوسي بشكل كامل وبالتالي تنتقل الحمولة كاملة إلى الجائز.

ملاحظة/3: لتبسيط الفعل القوسي للجدار من الممكن اعتبار أن (85%) من حمولة الجدار تنتقل إلى الجائز (بشكل تقريبي) وذلك بشكل حمولة موزعة بانتظام:

ملاحظة /4: إذا تعرض الجائز المستمر إلى حمولات موزعة بانتظام تتفاوت قيمتها بين مجاز وآخر بما يقل عن (10%) فيمكن القبول بتعميم الحمولة الأكبر على المجازات كافة بشرط ألا تزيد الحمولات الحية عن مرة ونصف الحمولات الميتة.

7-9 حدود النحافة في الجيزان:

إنَّ المنطقة المضغوطة في الجيزان مقيدة جانبياً ضد التحنيب الجانبي وذلك بسبب وجود البلاطة المتصلة بالجزء المضغوط كما في الشكل، بينما تكون المنطقة المضغوطة في الجيزان المقلوبة غير مقيدة ضد التحنيب الجانبي، لذلك يتم وضع روابط عرضية (كوابح تحنيب) وهي عبارة عن جيزان ثانوية لا تزيد المسافة الصافية بينها عن القيمة الأدنى بين القيمتين الآتيتين:

$$L = \min \left\{ \begin{array}{l} 30b_w \\ 250 \frac{b_w^2}{d} \end{array} \right. \quad (6-9)$$

b_w : عرض مقطع الجائز الرئيس في منطقة الضغط في منتصف المجاز.

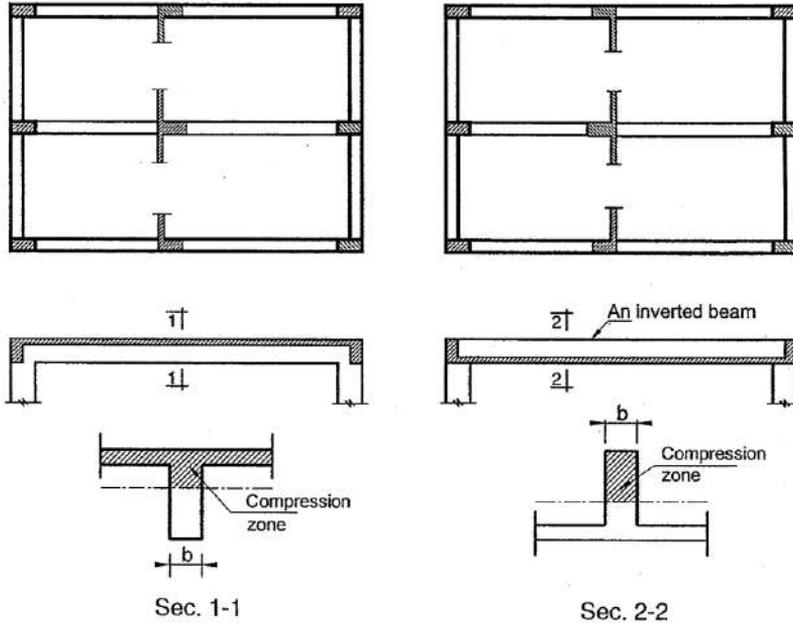
d : الارتفاع الفعال لمقطع الجائز في منتصف المجاز.

إذا لم يتحقق الشرط السابق بين كوابح التحنيب فإنه يتم تخفيض قدرة تحمل المقطع تبعاً للنسبة L/b_w بعامل تخفيض مبيّن في الجدول (4-9).

الجدول (4-9) عامل تخفيض قدرة تحمل المقطع

L/b_w	≤ 30	35	40	45	50	55	60
عامل التخفيض	1	0.875	0.75	0.625	0.5	0.375	0.25

في حالة الظفر يؤخذ الطول L في النسبة L/b_w مساوياً إلى ضعف طول الظفر من وجه المسند.



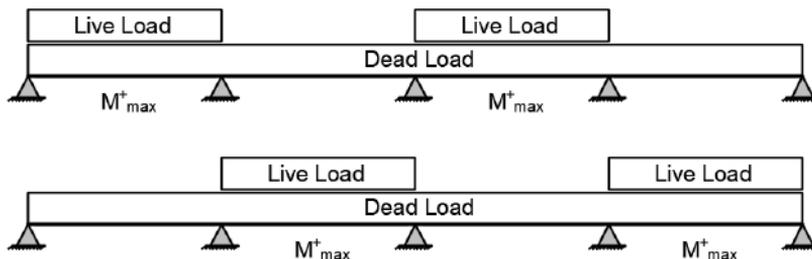
الشكل (9-24) الجيزان العادية والجيزان المقلوبة

8-9 التحليل الخطي المرن في الجيزان المستمرة Linear Elastic Analysis of Continuous Beams

يعتمد الكود العربي السوري التحليل الخطي المرن من أجل إيجاد عزوم الانعطاف وقوى القص في الجيزان المستمرة حيث يتم ترتيب الحمولات الحية والميتة بشكل متناوب بين المجازات المتجاورة للحصول على القيم العظمى لعزم الانعطاف والقوى القاطعة (مغلف العزم ومغلف الجهد القاطع) وهذا ما يسمّى بمبدأ التحميل الشطرنجي.

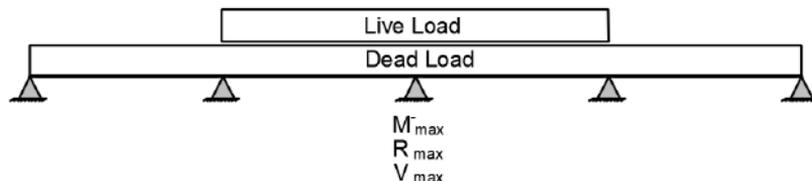
تؤثر الحمولات الميتة على مجازات الجائز المستمر جميعها بأن واحد وبشكل دائم، بينما يمكن أن تؤثر الحمولات الحية في مجاز واحد أو مجازين أو أكثر وهذا يتعلق باحتمال وجودها تبعاً لاستعمالات المنشأ المختلفة، لذلك يجب دراسة حالات التحميل المحتملة جميعها للوصول إلى القيم العظمى للعزوم والجهد القاطع؛ إذ إن تطبيق الحمولات الحية والميتة كاملة على طول الجائز لا يؤدي إلى الحصول على القيم العظمى لعزم الانعطاف والجهد القاطع في مقاطع الجائز جميعها.

- العزم الموجب الأعظمي: يحدث العزم الموجب الأعظمي عند تحميل المجازات المطلوبة بالحمولات الكاملة حية وميتة بينما لا تحمّل المجازات المجاورة بالحمولات الحية.



الشكل (9-25) التحميل الشطرني للجيزان من أجل العزم الموجب

- العزم السالب الأعظمي: يتم تحميل المجازين الواقعين مباشرة يمين ويسار المسند المطلوب حساب العزم السالب عنده بكامل الحمولات الحية والميتة، بينما يتم تحميل المجازات الأخرى بالحمولة الميتة إضافة إلى الحمولة الحية بالتناوب. هذا الترتيب ذاته يعطي القوة القاطعة العظمى يمين ويسار المسند ورد الفعل الأعظمي في المسند.



الشكل (9-26) التحميل الشطرني للجيزان من أجل العزم السالب ورد الفعل والقوة القاطعة

- حالة الظفر: يكون الجانز أحياناً منتهياً بظفر في إحدى نهايتيه أو في كليهما عند ترتيب حالات التحميل الشطرني يعامل الظفر كأنه مجاز، فاللحصول على العزم الأعظمي في المجاز المجاور للظفر يحمّل بالحمولة الميتة فقط، بينما للحصول على العزم الموجب الأعظمي في الفتحة ما قبل المجاورة للظفر يحمّل الظفر بحمولاته الميتة والحية معاً.

ملاحظة: يمكن إهمال التحميل الشطرني إذا كانت الحمولة الحية صغيرة بالمقارنة مع الحمولات الميتة وتحديداً إذا كانت الحمولة الحية المصعدة أقل من ثلث الحمولة الميتة المصعدة:

$$Q_u \leq \frac{1}{3} G_u \quad (7-9)$$

وذلك لأنَّ الفائدة من التحميل الشطرنجي في هذه الحالة تكون ضئيلة ومهملة وفي هذه الحالة يُعدُّ الجائز محملاً بكامل الحمولات الحية والميتة على كل المجازات.

9-9 تصعيد الحمولات:

عند تصميم التسليح وفق الحدود القصوى يتم تصعيد الحمولات الميتة والحية وغيرها بضرئها بعامل تصعيد خاص بكل حمولة وذلك من أجل إدخال عامل أمان على هذه الحمولات.

- في حال وجود حمولات ميتة وحية فقط:

$$Q_u = 1.7q = 1.7L \quad G_u = 1.4g = 1.4D$$

$$W_u = 1.7L + 1.4D$$

- التركيبان المتعلقان بالرياح:

$$1.2D + 1.6(L_r \text{ or } S) + (f_1L \text{ or } 0.8W)$$

$$1.2D + 0.5(L_r \text{ or } S) + f_1L + 1.3W$$

- التركيبان المتعلقان بالزلازل أو الرياح:

التركيب الأساسي:

$$1.1(1.2D \pm E + (f_1L + f_2S))$$

التركيب الثانوي:

$$1.1(0.9D \pm E \text{ or } 1.18W)$$

q,L: الحمولة الحية.

g,D: الحمولة الميتة.

W: حمولة الرياح.

S: حمولة الثلج.

E: حمولة الزلازل.

9-10 العزم الاعتباري:

يكون العزم الاعتباري في المسند الطرفي معدوماً في حساب الإنشاءات، ولكن في حسابات البيتون المسلح يتم فرض عزم اعتباري في المساند الطرفية قيمته تساوي ثلث العزم الموجب الأعظمي في الجيزان. يتم اعتبار هذا العزم بسبب عرض الاستناد إضافة لحالات سوء التنفيذ حيث قد يحصل عدم تمحور في استناد الجيزان على الأعمدة.

9-11 تأثير عرض المسند:

بسبب تأثير عرض المسند تنخفض قيم العزوم السالبة فوق المساند الداخلية عن القيم المحسوبة في حساب الإنشاءات حيث تُعد المسند نقطياً، مما يؤدي إلى زيادة في العزوم الموجبة.

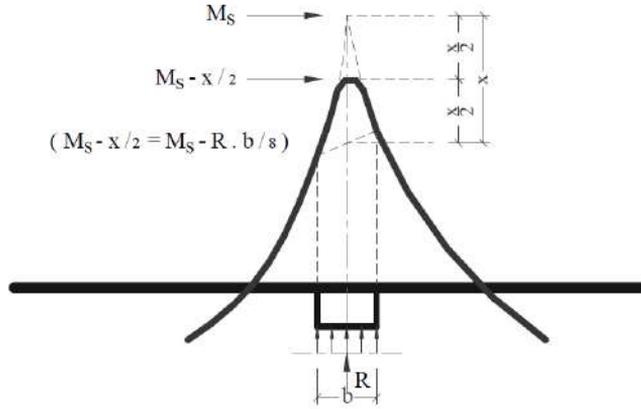
$$M = M - \frac{Rb_s}{8} \quad (8-9)$$

يتم تخفيض العزوم السالبة فوق المساند بنسبة تقريبية وسطية تساوي حوالي (15%) وزيادة العزوم الموجبة في المجازات بما يتناسب مع هذا التخفيض، وتسمى هذه العملية عملية إعادة توزيع العزوم.

$$\Delta M = 0.15M^- \quad (9-9)$$

حيث يتم إنقاص هذه القيمة من العزم السالب وزيادتها على العزوم الموجبة، ويشترط الكود السوري ألا تتجاوز نسبة التعديل القيمة التالية:

$$\Delta M \% = 30 \frac{A_s - A'_s}{A_{sb}} \quad (10-9)$$



الشكل (9-27) تأثير عرض المسند على مخطط العزم

إن إجراء إعادة توزيع العزوم هو إجراء خاص بالطرق الدقيقة ولا يستخدم مع الطرق التقريبية.

9-12 طريقة الكود العربي السوري في إيجاد قيم العزوم السالبة والقوى القاطعة وردود الأفعال في الجيزان المستمرة:

تستخدم طريقة الكود السوري من أجل جيزان مستمرة ذات مجازات شبه متساوية وذات ارتفاعات حيث يجب تحقيق الشروط الثلاث الآتية:

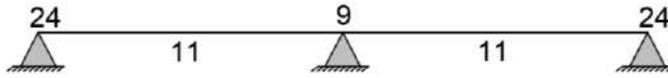
- 1- جميع الحمولات موزعة بانتظام.
- 2- لا يزيد الحمل الحي المصعد عن ضعفي الحمل الميت المصعد.
- 3- لا يختلف كل مجازين متجاورين عن بعضهما بأكثر من (25%) من المجاز الأكبر.

عند تحقق هذه الشروط مجتمعة تؤخذ العزوم وقوى القص وردود الأفعال كما يلي:

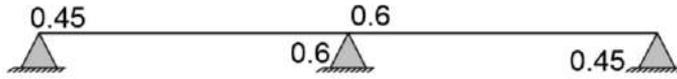
- حالة جيزان مؤلفة من مجازين فقط:

عزم الانعطاف حيث يُعطى عزم الانعطاف بالمعادلة $M = \frac{WL^2}{k_m}$ وتعطى k_m بالشكل الآتي باعتبار

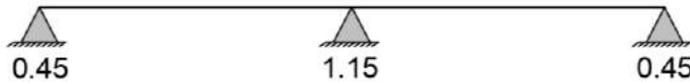
القيم أسفل الجائز موجبة وأعلى سالبة:



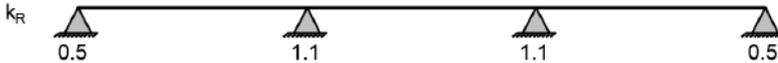
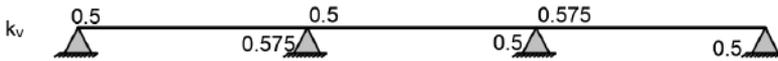
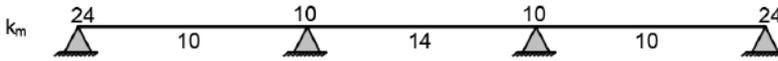
قوى القص (الجهد القاطع)، وتعطى بالمعادلة $V = k_v WL$ وتعطى k_v بالشكل الآتي باعتبار القيم أعلى الجائز موجبة وأسفله سالبة:



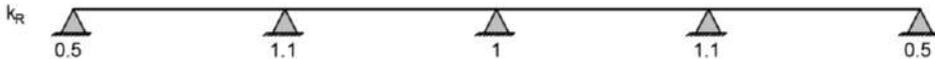
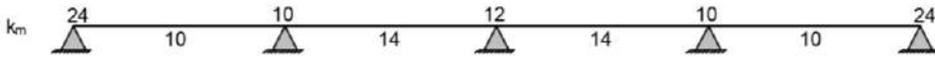
ردود الأفعال، وتعطى بالمعادلة $R = k_R WL$ وتعطى k_R بالشكل الآتي:



• حالة جيزان مؤلفة من ثلاثة مجازات:



• حالة جيزان مؤلفة من أربعة مجازات فأكثر:



ملاحظات مهمة:

عند اختلاف قيم الحمولة الموزعة بانتظام أو طول المجاز على جانبي المسند الوسطي يتم اتباع ما يلي:

• لحساب العزم: تؤخذ الحمولة مساوية إلى متوسط الحملين الكليين للمجازين المتجاورين

$$W = W_{avg} \text{ ويؤخذ طول المجاز الأكبر بين المجازين المتجاورين } L = L_{max}$$

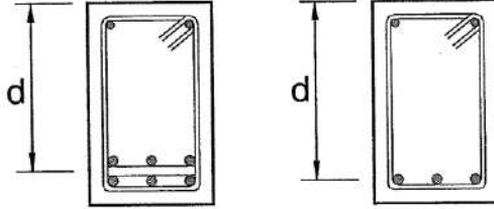
• لحساب رد الفعل: تؤخذ الحمولة مساوية إلى متوسط الحملين الكليين للمجازين المتجاورين

$$W = W_{avg} \text{ ويؤخذ طول المجاز مساوياً إلى متوسط المجازين المتجاورين } L = L_{avg}$$

9-13 ترتيبات التسليح في جيزان البيتون المسلح:

9-13-1 الارتفاع الفعال d:

الارتفاع الفعال d في الجيزان هو عبارة عن المسافة بين الليف المضغوط إلى مركز التسليح المشدود كما في الشكل (9-28).



الشكل (9-28) الارتفاع الفعال في الجيزان

9-13-2 تغطية البيتون Concrete Cover

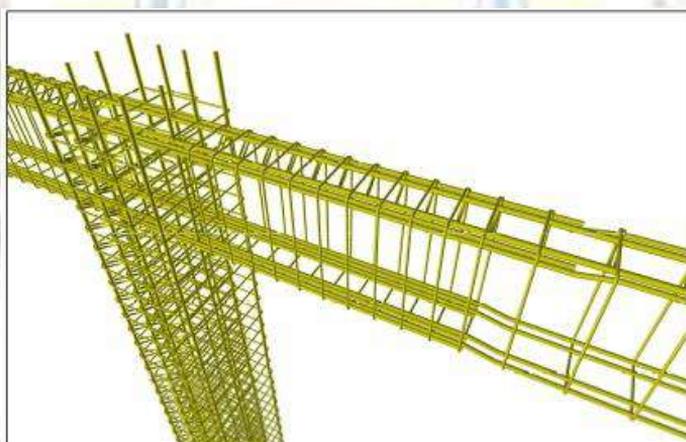
من الضروري وجود تغطية للبيتون c بين سطح الجانز والتسليح من أجل تأمين الأمور الآتية:

- تأمين الالتحام بين التسليح والبيتون حيث إنَّ العنصرين يتصرفان كمادة واحدة. إنَّ فعالية الالتحام تزداد مع زيادة التغطية حيث إنَّ الحد الأدنى للتغطية من أجل تأمين الالتحام هو قطر سيخ واحد.
- لحماية حديد التسليح من التآكل Corrosion: في الأوساط عالية التآكل مثل الجيزان المنشأة قرب المحيطات يجب زيادة تغطية البيتون.
- لحماية فولاذ التسليح من نقصان المقاومة بسبب ارتفاع درجة حرارته في حال حدوث حريق.

- يبيّن الجدول التالي الحد الأدنى لتغطية البيتون بحسب العنصر البيتوني المدروس وبحسب الظروف الجوية:

الجدول (5-9) سماكة التغطية في العناصر

25mm	جيزان وأعمدة	منشآت داخلية
15mm	بلاطات وجدران	
30mm	جيزان وأعمدة	منشآت خارجية
20mm	بلاطات وجدران	
40mm	جيزان وأعمدة	منشآت خارجية في جو حاو
30mm	بلاطات وجدران	على رطوبة ملحية
50mm	كافة العناصر	أساسات وعناصر على تماس مع التربة



الشكل (9-29) إرساء تسليح الجائز ضمن العمود، مرجع رقم (10)

9-13-3 ترتيب التسليح الطولي:

- أ. أقل عدد مستخدم من القضبان في الجيزان هو $d/2$.
- ب. أقل قطر مستخدم من التسليح الطولي هو 12mm فما فوق، وأقطار القضبان المتوفرة هي: 12-14-16-18-20-22-25-28-32-35-38-42
- ج. يسمح باستخدام قطرين مختلفين لا أكثر بشرط كون الفارق بين القطرين لا يزيد على درجتين.

د. توضع الكمية الأكبر من التسليح بالأسفل بشكل متناظر بالنسبة لمحور شاقولي.
هـ. إذا لم يكن عرض الجائز b كافياً من أجل توضع التسليح الطولي، فإنه يرتب على طبقات Layers بشرط تحقيق التباعد الشاقولي بين الطبقات e_v إن فولاذ الطبقة الثانية ينقص من الارتفاع d لذلك يتم العمل على زيادة قيمة التسليح قليلاً. توضع القضبان مباشرة فوق بعضها لضمان رج البيتون بشكل جيد باستخدام الرجاج.

4-13-9- التباعد بين قضبان التسليح Bar Spacing

إن ترتيب قضبان التسليح في المقطع العرضي يجب أن يحقق ما يلي:

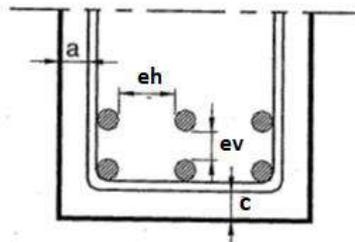
- بيتون كافٍ من كل أطراف قضبان التسليح لتأمين نقل القوى إلى القضبان.
- مسافة كافية بين القضبان للسماح للبيتون المصبوب بالتوضع والرض حول القضبان.
- مسافة كافية للسماح للرجاج بالوصول إلى أسفل الجائز.

○ المسافة الأفقية بين القضبان:

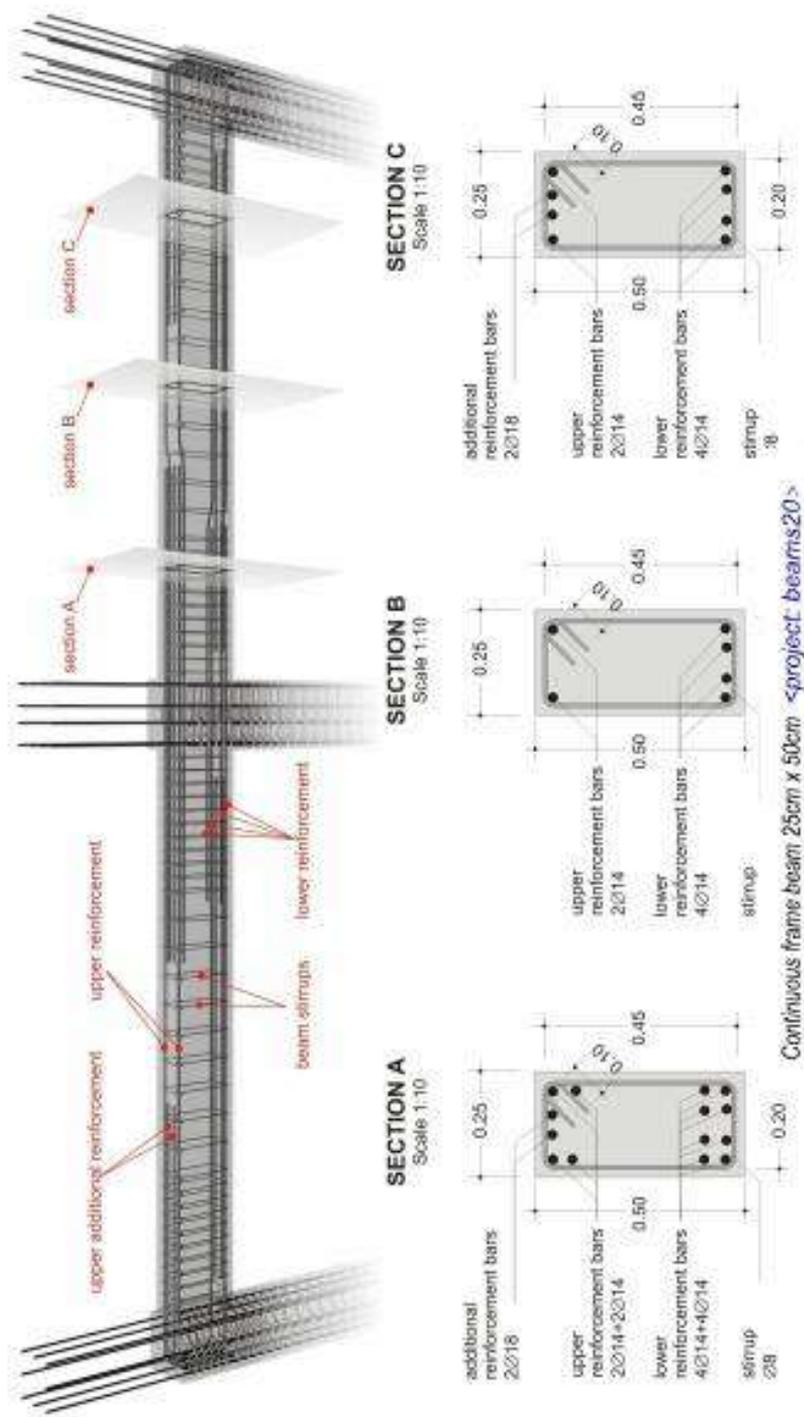
$$e_h = \max \begin{cases} 25mm \\ \phi_{max} \\ 1.5Max \text{ Aggregate Size} \end{cases} \quad (11-9)$$

○ المسافة الشاقولية بين القضبان:

$$e_v = \max \begin{cases} 20mm \\ 0.75\phi_{max} \\ Max \text{ Aggregate Size} \end{cases} \quad (12-9)$$



الشكل (9-30) التباعد الأفقي والشاقولي في التسليح الطولي



الشكل (9-31) تسليح الجيزان المستمرة، مرجع رقم (10)

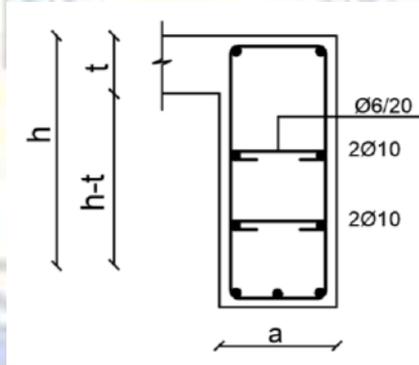
5-13-9 Shrinkage side bars التسليح التقلص

عندما يتجاوز ارتفاع الجائز أسفل البلاطة 60cm أو تزيد مساحة مقطعه العرضي على 2000cm^2 تتم إضافة قضبان طولية على طول الوجهين الجانبيين للجائز تسمى قضبان التقلص، وتحقق قضبان التقلص الشروط الآتية:

- العدد: يحدد العدد بحيث لا يزيد التباعد الشاقولي بين قضبان التقلص على 30cm.
- القطر: لا يقل قطر قضبان التقلص عن نصف قطر أكبر سيخ في التسليح الطولي المحسوب أو 10mm أيهما أكبر.

$$\phi_{sh} = \max \left\{ \begin{array}{l} 10\text{mm} \\ \phi_{\max} / 2 \end{array} \right. \quad (13-9)$$

- المساحة: لا تقل مساحة تسليح التقلص عن: $A_{sh} = 0.001bd$



الشكل (9-32) تسليح التقلص

6-13-9 الجائز ذو المقطع T

يجب أن يتم صب الجناح بشكل يؤمن تكامل الجناح والجذع بشكل كامل، كذلك الأمر يجب إضافة تسليح علوي معامد لمحور الجائز ضمن الجناح كشرط لتأمين الفعل المشترك Monolithic Action بين الجناح والجذع ولا تقل مساحة هذا التسليح عن 0.3% من مساحة مقطع الجناح. ويجب أن يستمر ليغطي كامل العرض الفعال للجناح. ويجب ألا يزيد التباعد بين هذا التسليح العرضي عن 20cm. تستمر الأساور في المقطع T إلى أعلى الجناح لضمان الفعل المشترك بين الجناح والجذع.

مثال تطبيقي (9-1):

يبين الشكل (9-33) مسقطاً معمارياً Architectural Plan لطابق نموذجي في مبنى مكاتب، والمطلوب: ارسم النظام الإنشائي للطابق باعتباره جيزان أعمدة، ارسم الحمولات المنقولة من البلاطات إلى الجيزان.

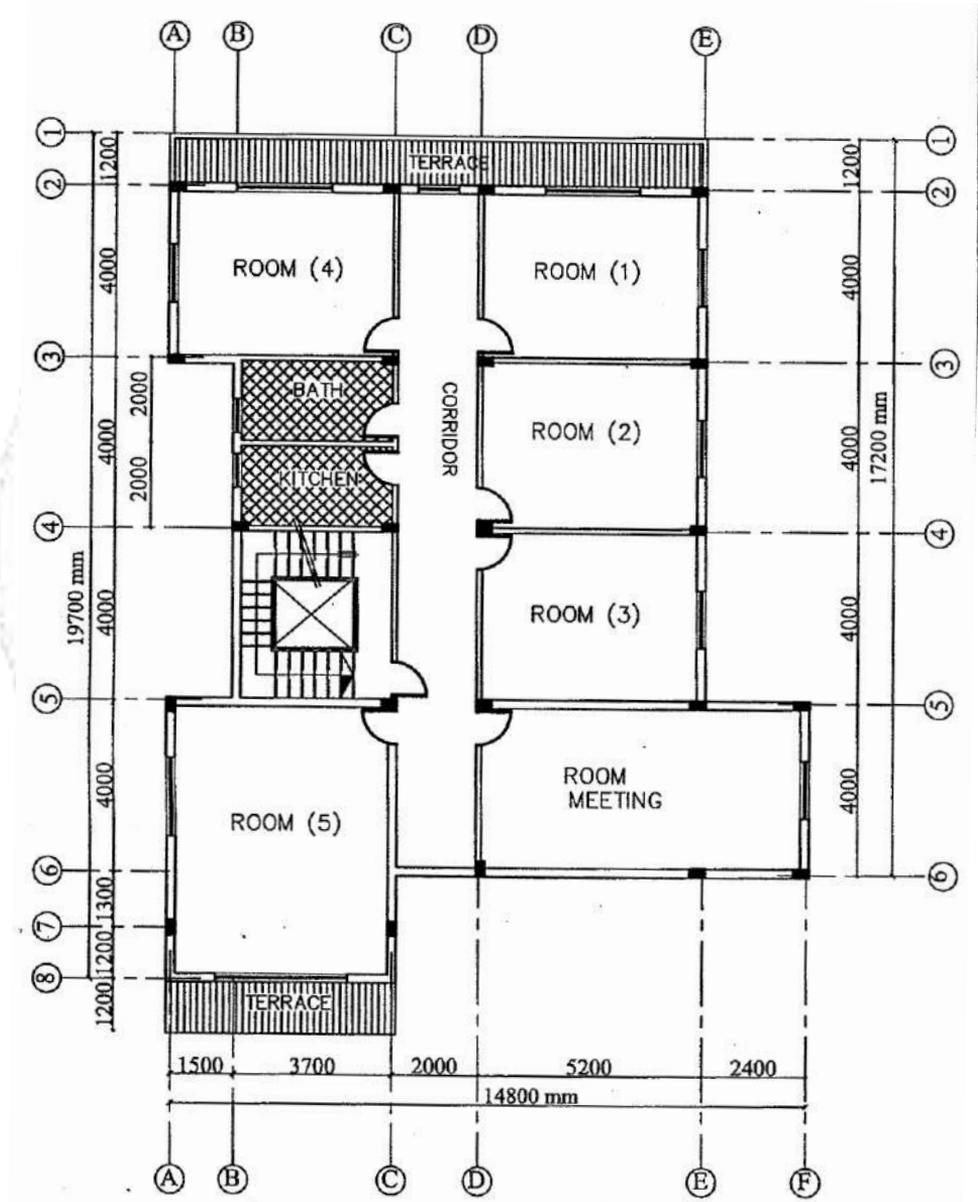
الحل:

يتعاون كل من المهندس الإنشائي والمهندس المعماري مع بعضهما من أجل إنشاء النظام الإنشائي للمبنى وتوفير المتطلبات المعمارية في نفس الوقت. بشكل عام يمكن وضع الجيزان في مواقع الجدران ويكون عرضها مساوياً لعرض الجدار إن أمكن حتى يمكن إخفاؤها.

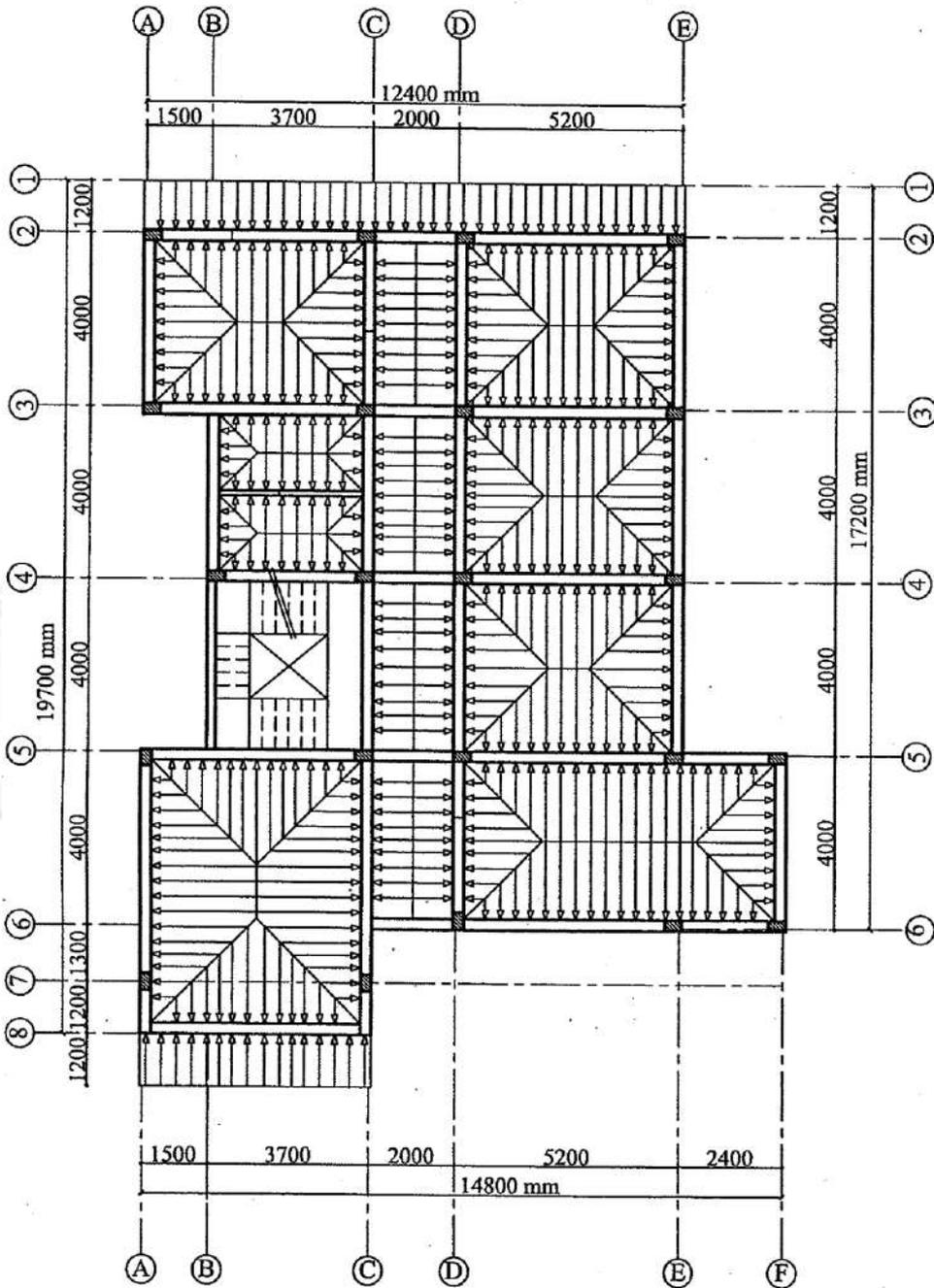
نلاحظ الملاحظات التالية في المسقط المعماري:

- 1- هناك شرفتان في المسقط كلاهما تعمل بشكل ظفري Cantelever Slab نظراً لأنَّ البعد القصير 1.2m صغير بالنسبة للبعد الطويل. ومن أجل أظفار بمجازات أقل من 2m في الاتجاه القصير يكون الظفر مقبولاً في حين عندما يزيد الاتجاه القصير على 2m فإنَّ الانتقالات تزداد وبالتالي يفضل عدم استخدام بلاطة ظفرية.
- 2- لا توجد جدران في الممر Corredor وفق المحاور (3,4,5) وبالتالي هناك حرية في إضافة الجيزان بين الأعمدة وفق المحورين C,D أو ترك المساحة في الممر فارغة، وبما أنه من المقبول معمارياً وضع جيزان في الممر فإنه من الأفضل من أجل تحسين الفعل الإطاري Frame Action في البناء إضافة تلك الجيزان.
- 3- إنَّ مساحات البلاطات في المسقط معقولة نسبياً ولا داع لإضافة جيزان ضمن البلاطات لتخفيض مساحاتها. على سبيل المثال أبعاد البلاطة في غرفة الاجتماعات Meeting Room هي $4 \times 7.5m$. يمكن تقسيم مساحة هذه البلاطات إلى بلاطتين إذا تمت إضافة جائز وفق المحور E بين المحورين (5,6) ولكن ذلك غير مرغوب معمارياً، وينبغي على المهندس الإنشائي تأمين السماكة الكافية للبلاطة ومساحة التسليح المناسبة من أجل مساحة بلاطة كهذه من أجل تأمين المتطلبات المعمارية، وتطبق ذات الملاحظات على الغرفة 5 حيث يتم إضافة جائز وفق المحور 7 بين المحورين A,C.

4- معظم الجيزان تستند إلى أعمدة إلا في حالات خاصة مثل الجائز المتوضع وفق المحور B حيث يستند إلى جائز آخر وهو الجائز الظفري الممتد وفق المحور A والجائز الظفري الممتد وفق المحور C.



الشكل (9-33) مسقط بناء بلاطات مليئة، مرجع رقم (8)

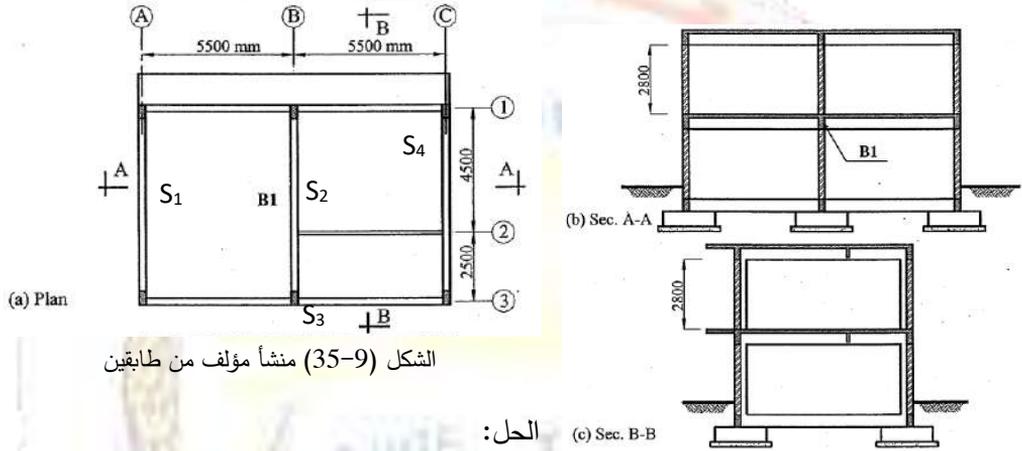


الشكل (9-34) نقل أحمال البلاطات إلى الجيزان، مرجع رقم (8)

مثال تطبيقي (9-2):

يُطلب حساب الحمولات المطبقة على الجائز البسيط B_1 في المنشأ المبين بالشكل (9-35)،
 علماً بأن:

الحمولة الحية $Live\ Load = 2\text{kN/m}^2$ ، الإكساء والتغطية $Flooring = 1.5\text{kN/m}^2$ ، الوزن الذاتي للجدار
 من البلوك المفرغ $W_w = 4.5\text{kN/m}^2$. افترض سماكة البلاطة $h_s = 150\text{mm}$ وعرض الجدران 250mm .



الشكل (9-35) منشأ مؤلف من طابقين

الحل:

- 1- إن النموذج الإنشائي للجائز B_1 عبارة عن جائز بسيط بطول 7m .
- 2- أبعاد الجائز: يتم فرض عرض الجائز مساوياً لعرض الجدار 250mm ويتم تحديد ارتفاع الجائز بحيث يحقق شرط السهم:

$$h = \frac{L}{14} = \frac{700}{14} = 50\text{cm}$$

وبالتالي تكون أبعاد المقطع العرضي مساوية $25 \times 50\text{cm}$.

3- الحمولات:

- الوزن الذاتي:

$$\text{Beam SW} = 0.25 \times 0.5 \times 25 = 3.125\text{kN/m}$$

- الحمولات المنقولة من البلاطة إلى الجائز:

○ الحمولة الميتة للبلاطة:

$$g_s = \text{Slab SW} + \text{Flooring} = 0.15 \times 25 + 1.5 = 5.25 \text{ kN/m}^2$$

○ الحملية الحية للبلاطة:

$$q_s = 2 \text{ kN/m}^2$$

4- اتجاه عمل البلاطات:

Two-Way Slabs بلاطات تعمل باتجاهين $S_1 S_2$

البلاطة S_1 :

$$r_1 = \frac{m_1 L_1}{m_2 L_2} = \frac{7000}{0.87 \times 5500} = 1.463 < 2$$

البلاطة S_2 :

$$r_2 = \frac{m_1 L_1}{m_2 L_2} = \frac{0.87 \times 5500}{0.87 \times 4500} = 1.22 < 2$$

S_3 : بلاطة تعمل باتجاه واحد One-way Slab:

$$r_3 = \frac{m_1 L_1}{m_2 L_2} = \frac{0.87 \times 5500}{0.87 \times 2500} = 2.2 > 2$$

وهي تنقل الحملات إلى الجيزان على المحورين (2) و(3).

S_4 : بلاطة ظرفية وتنقل الحملية مباشرة إلى الجائز على المحور (1).

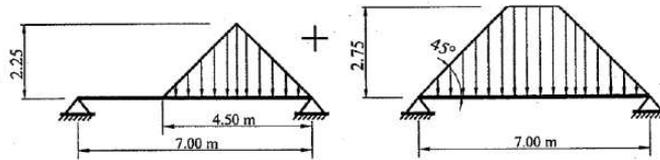
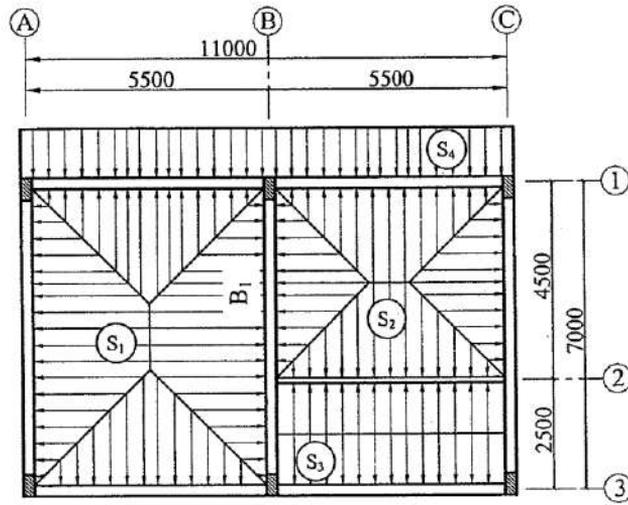
• تنتقل حملية البلاطات إلى الجائز B_1 على جزئين:

○ الجزء الأول عبارة عن حملية شبه منحرفة ومثلثية منقولة من البلاطات مباشرة.

○ الجزء الثاني عبارة عن الحملية المركزة القادمة من الجائز الواقع على المحور (2).

يمكن استبدال الحملية شبه المنحرفة بحملية موزعة بانتظام تغطي كامل المجاز وتعطي نفس القيمة العظمى للقوة المدروسة.

$$\rho = \frac{7}{5.5} = 1.27; \quad \alpha = 0.793; \quad \beta = 0.605$$



الشكل (9-36) نقل أحمال البلاطات إلى الجيزان

إن الحمولة المكافئة الميتة من أجل الانعطاف تساوي:

$$5.25 \times 0.793 \times 2.75 = 11.45 \text{ kN/m}$$

إن الحمولة المكافئة الميتة من أجل القص تساوي:

$$5.25 \times 0.605 \times 2.75 = 8.73 \text{ kN/m}$$

المكافئة الحية من أجل الانعطاف تساوي:

$$2 \times 0.793 \times 2.75 = 4.63 \text{ kN/m}$$

إن الحمولة المكافئة الحية من أجل القص تساوي:

$$2 \times 0.605 \times 2.75 = 3.33 \text{ kN/m}$$

إنَّ حمولة البلاطة المثالية غير موزعة على كامل المجاز ، لذلك يتّم اتباع الطريقة التقريبية لإيجاد القيمة المكافئة لها:

الحمولة الموزعة بانتظام من أجل الحمولة المثالية الميئة = (الطول المحمل) / (المساحة المحملة $\times g_s$)

$$DL_{S2} = \frac{5.25 \times 4.5 / 2 \times 2.25}{4.5} = 5.9 \text{ kN/m}$$

$$LL_{S2} = \frac{2 \times 4.5 / 2 \times 2.25}{4.5} = 2.25 \text{ kN/m}$$

• حمولة الجدار:

ارتفاع الجدار 2.8m: إنَّ الحمولة عبارة عن حمولة شبه منحرفة بزواوية 60° بتباعد

$$x = H_w \times \text{tg}(30)$$

من أجل التسهيل تتم مكافأة الحمولة بحمولة موزعة بانتظام من أجل حساب عزم الانعطاف والجهد القاطع.

$$\frac{L}{2x} = \frac{7}{2 \times 2.8 \times \text{tg}30} = 2.16 > 2$$

وبالتالي تكون الحمولة المكافئة لحمولة الجدار من أجل حساب العزم والجهد القاطع على الجائز:

$$g_{wb} = g_{wsh} = g_w h_w = 4.5 \times 2.8 = 12.6 \text{ kN/m}$$

• الحمولة المركزة:

عبارة عن رد فعل الجائز الثانوي وفق المحور (2) والذي يحمل البلاطة بالإضافة إلى وزنه الذاتي.

1- الوزن الذاتي: بفرض أبعاد الجائز الثانوي $200 \times 500 \text{ mm}$ فيكون وزنه الذاتي:

$$B_{SW} = 0.2 \times 0.5 \times 25 = 2.5 \text{ kN/m}$$

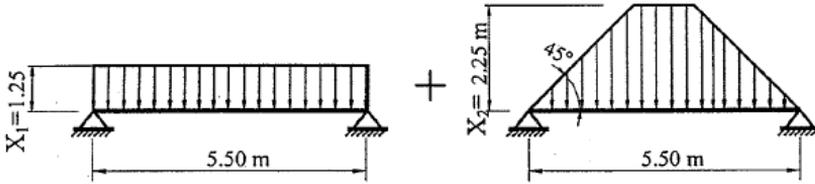
2- حمولة البلاطة المنقولة إلى الجائز الثانوي:

تتألف من حمولة مستطيلة موزعة بانتظام وحمولة شبه منحرفة. بما أنه يُراد حساب رد الفعل في الجائز الثانوي فإنه يتم حساب الحمولة المكافئة من أجل الجهد القاطع فقط:

$$\frac{L}{2x} = \frac{5.5}{4.5} = 1.22 \quad \beta = 0.589$$

$$S_{DL} = g_s X_1 + g_s X_2 \beta = 5.25 \times 1.25 + 5.25 \times 2.25 \times 0.589 = 13.52 \text{ kN/m}$$

$$S_{LL} = q_s X_1 + q_s X_2 \beta = 2 \times 1.25 + 2 \times 2.25 \times 0.589 = 5.15 \text{ kN/m}$$



وتكون الحمولة الميتة الكلية الموزعة بانتظام: $g_{sh} = B_{SW} + S_{DL} = 16.02 \text{ kN/m}$

وتكون الحمولة الحية الكلية الموزعة بانتظام: $g_{sh} = S_{LL} = 5.15 \text{ kN/m}$

$$R_g = \frac{g_{sh} L}{2} = \frac{16.02 \times 5.5}{2} = 44.06 \text{ kN}$$

رد الفعل الناتج عن الحمولة الميتة:

$$R_q = \frac{q_{sh} L}{2} = \frac{5.15 \times 5.5}{2} = 14.2 \text{ kN}$$

رد الفعل الناتج عن الحمولة الحية:

ملخص الحمولات:

• الحمولة الميتة المكافئة من أجل الانعطاف:

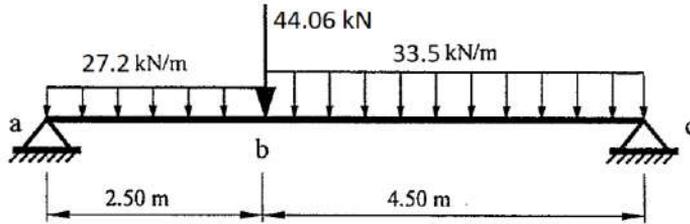
○ الجزء AB:

$$g_b = B_{SW} + S_{DL} + Wall = 3.125 + 11.45 + 12.6 = 27.18 \text{ kN/m}$$

○ الجزء BC:

$$g_b = B_{SW} + S_{DL} + Wall = 3.125 + (11.45 + 5.9) + 12.6 = 33.48 \text{ kN/m}$$

إنَّ الحمولة المركزة عبارة عن رد الفعل الناتج عن الحمولة الميتة على الجائز وفق المحور (2) ويساوي . 44.06kN



• الحمولة الميتة المكافئة من أجل الجهد القاطع:

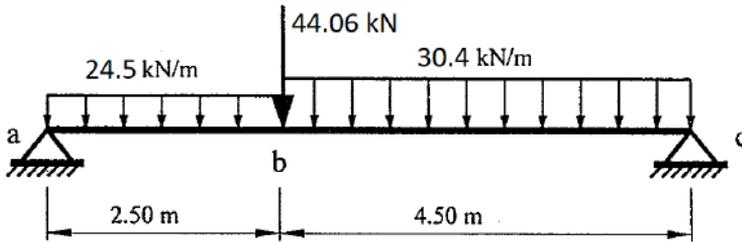
○ الجزء AB:

$$g_{sh} = B_{SW} + S_{DL} + Wall = 3.125 + 8.73 + 12.6 = 24.46 \text{ kN/m}$$

○ الجزء BC:

$$g_b = B_{SW} + S_{DL} + Wall = 3.125 + (8.73 + 5.9) + 12.6 = 30.355 \text{ kN/m}$$

إن الحمولة المركزة عبارة عن رد الفعل الناتج عن الحمولة الميتة على الجائز وفق المحور (2) ويساوي . 44.06kN



• الحمولة الحية المكافئة من أجل الانعطاف:

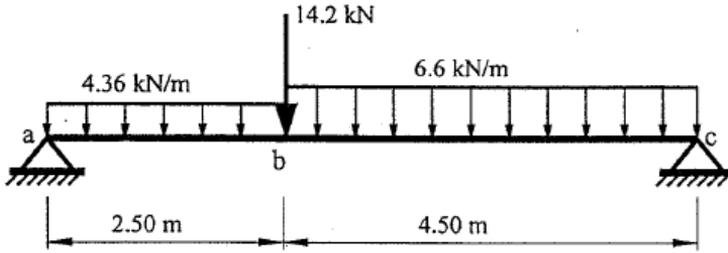
○ الجزء AB:

$$q_b = S_{LL} = 4.36 \text{ kN/m}$$

○ الجزء BC:

$$q_b = S_{LL} = 4.36 + 2.25 = 6.6 \text{ kN/m}$$

إنَّ الحمولة المركزة عبارة عن رد الفعل الناتج عن الحمولة الحية على الجائز وفق المحور (2) ويساوي إلى 14.2kN



• الحمولة الحية المكافئة من أجل الجهد القاطع:

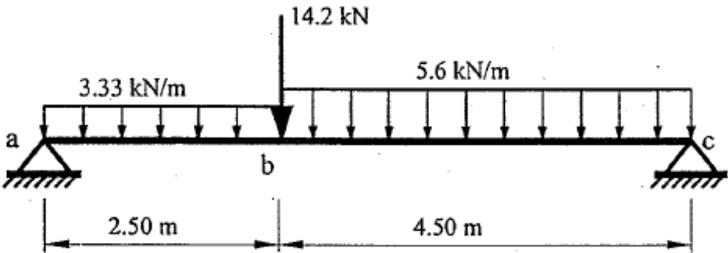
○ الجزء AB:

$$q_{sh} = S_{LL} = 3.33 \text{ kN/m}$$

○ الجزء BC:

$$q_{sh} = S_{LL} = 3.33 + 2.25 = 5.6 \text{ kN/m}$$

إنَّ الحمولة المركزة عبارة عن رد الفعل الناتج عن الحمولة الحية على الجائز وفق المحور (2) ويساوي إلى 14.2kN



مثال تطبيقي (3-9):

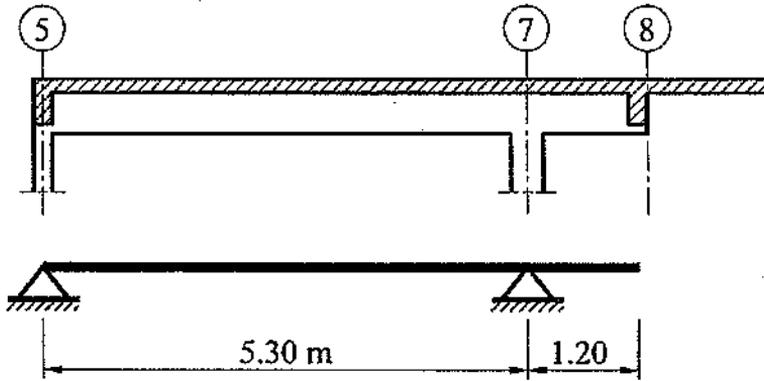
احسب الحمولات المطبقة على الجائز البسيط ذي الظفر (B₂) في المثال التطبيقي رقم (3-9)،

وذلك وفقاً للمحاور (8)، (7)، (5)، والمحور (A) علماً بأن:

- الحمولة الحية Live Load=2kN/m²
- الإكساء والتغطية Flooring=1.5kN/m²
- الارتفاع الطائفي 3.5m
- وزن المتر المكعب من الجدار 14.8kN/m³

الحل:

إن النموذج الإنشائي للجائز عبارة عن جائز بسيط ذو ظفر:



حساب الحمولات:

- الوزن الذاتي للجائز: بحسب شرط السهم يكون ارتفاع الجائز:

$$h = \frac{L}{14} = \frac{5300}{14} = 400\text{mm} \Rightarrow h = 450\text{mm}$$

نفرض ارتفاع الجائز مساوياً 450mm فيكون الوزن الذاتي:

$$B_{sw} = 0.25 \times 0.45 \times 25 = 2.813\text{kN/m}$$

- الحمولة المنقولة إلى الجائز عبر البلاطة: بفرض سماكة البلاطة تساوي 150mm

$$S_{sw} = 0.15 \times 25 = 3.75 \text{ kN/m}^2 \text{ : الوزن الذاتي للبلاطة}$$

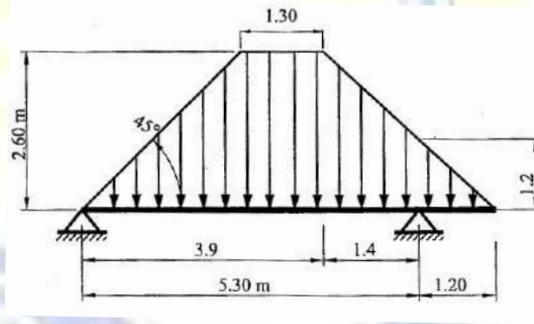
○ الحمولة الميتة للبلاطة:

$$g_s = S_{sw} + \text{Flooring} = 3.75 + 1.5 = 5.25 \text{ kN/m}^2$$

○ الحمولة الحية للبلاطة: $q_s = 2 \text{ kN/m}^2$

إنَّ الحمولة المنقولة من البلاطة إلى الجائز B_2 عبارة عن جزأين:

- حمولة شبه منحرفة قادمة مباشرة من البلاطة.
- حمولة مركزة عبارة عن رد فعل الجائز الثانوي B_1 وفقاً للمحور (A)-(C), (8).



بما أنَّ الحمولة ليست على كامل المجاز يتمُّ استخدام الطريقة التقريبية (طريقة المساحة) حيث تساوي الحمولة المكافئة إلى جداء حمولة البلاطة بالمساحة المحملة مقسوماً على طول المجاز المحمل. بحسب الشكل أعلاه نوجد منطقتان للحمولة: الأولى بطول 5.3m بين المساند والثانية بطول 1.2m وهي ظفرية.

- بين المسندين:

$$\text{Loaded Area} = \frac{2.6 \times 2.6}{2} + 2.6 \times 1.3 + \left(\frac{2.6 + 1.2}{2} \right) 1.4 = 9.42 \text{ m}^2$$

$$S_{DL1} = \frac{5.25 \times 9.42}{5.3} = 9.33 \text{ kN/m}$$

$$S_{LL1} = \frac{2 \times 9.42}{5.3} = 3.55 \text{ kN/m}$$

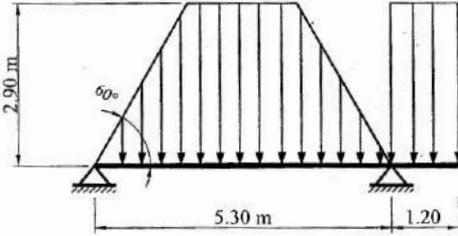
- جزء الظفر:

$$\text{Loaded Area} = \frac{1.2^2}{2} = 0.72 \text{ m}^2$$

$$S_{LL2} = \frac{2 \times 0.72}{1.2} = 1.2 \text{ kN/m} \quad S_{DL2} = \frac{5.25 \times 0.72}{1.2} = 3.15 \text{ kN/m}$$

• حمولة الجدار:

$$g_w = \gamma_w t_w + \text{Plastering Weight} = 14.8 \times 0.25 + 0.8 = 4.5 \text{ kN/m}^2$$



إن ارتفاع الجدار يساوي إلى الارتفاع الطائفي مطروحاً منه ارتفاع الجائز.

$$H_w = 3.5 - 0.6 = 2.9 \text{ m}$$

$$x = \frac{H_w}{\text{tg } 60} = \frac{H_w}{\sqrt{3}} = \frac{2.9}{\sqrt{3}} = 1.67 \text{ m}$$

$$\frac{L}{2x} = \frac{5.3}{2 \times 1.67} = 1.58 \Rightarrow \alpha = 0.867, \beta = 0.684$$

- بين المسندين:

الحمولة المكافئة الموزعة بانتظام لحمولة الجدار من أجل الانعطاف:

$$g_{wb} = \alpha \times g_w \times H_w = 0.867 \times 4.5 \times 2.9 = 11.31 \text{ kN/m}$$

الحمولة المكافئة الموزعة بانتظام لحمولة الجدار من أجل الجهد القاطع (القص):

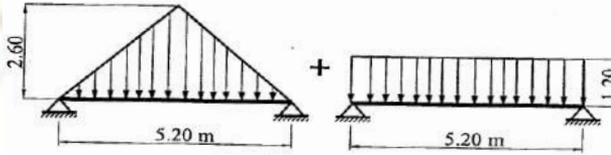
$$g_{wsh} = \beta \times g_w \times H_w = 0.684 \times 4.5 \times 2.9 = 8.93 \text{ kN/m}$$

جزء الظفر: بما أن حمولة الجدار على الظفر موزعة بانتظام بالأصل، تكون ذاتها للانعطاف والقص:

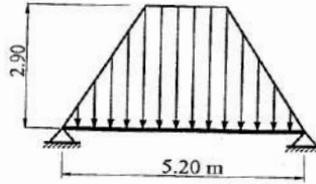
$$g_w = 4.5 \times 2.9 = 13.05 \text{ kN/m}$$

• الحمولة المركزة:

وهي عبارة عن رد فعل الجانز الثاني B_1 ، وبالتالي ندرس الحمولات على الجانز الثاني من أجل الجهد القاطع فقط بغية حساب رد فعله:
الحمولات على الجانز B_1 هي البلاطة، الجدار والوزن الذاتي:



Direct slab loads on B1



- الوزن الذاتي: بفرض أبعاد الجانز الثانيوي $250 \times 450 \text{ mm}$ يكون:

$$B_{sw} = 0.25 \times 0.45 \times 25 = 2.81 \text{ kN/m}$$

- حمولة البلاطة:

○ حمولة البلاطة الميتة من أجل الجهد القاطع تساوي إلى حمولة مثلثية

(بلاطة عاملة باتجاهين) وحمولة موزعة بانتظام (بلاطة عاملة باتجاه

وحيد).

$$g_{sh} = \beta \times g_s \times X_1 + g_s \times X_2 = 0.5 \times 5.25 \times 2.6 + 5.25 \times 1.2 = 13.125 \text{ kN/m}$$

○ حمولة البلاطة الميتة من أجل الجهد القاطع تساوي إلى حمولة مثلية (بلاطة عاملة باتجاهين) وحمولة موزعة بانتظام (بلاطة عاملة باتجاه واحد).

$$q_{sh} = \beta \times q_s \times X_1 + q_s \times X_2 = 0.5 \times 2 \times 2.6 + 2 \times 1.2 = 5kN / m$$

- حمولة الجدار:

$$g_w = \gamma_w t_w + \text{Plastering Weight} = 14.8 \times 0.25 + 0.8 = 4.5kN / m^2$$

إن ارتفاع الجدار يساوي إلى الارتفاع الطائفي مطروحاً منه ارتفاع الجائز.

$$H_w = 3.5 - 0.6 = 2.9m$$

$$x = \frac{H_w}{tg60} = \frac{H_w}{\sqrt{3}} = \frac{2.9}{\sqrt{3}} = 1.67m$$

$$\frac{L}{2x} = \frac{5.2}{2 \times 1.67} = 1.55 \Rightarrow \alpha = 0.862, \beta = 0.678$$

حمولة الجدار المكافئة من أجل الجهد القاطع:

$$W_{sh} = \beta \times g_w \times H_w = 0.678 \times 4.5 \times 2.9 = 8.85kN / m$$

- الحمولة الكلية:

$$G_{sh} = B_{sw} + \text{Slab} + \text{Wall} = 2.81 + 13.125 + 8.85 = 24.79kN / m \quad \text{ميتة:}$$

$$Q_{sh} = 5kN / m \quad \text{حية:}$$

- ردود الأفعال:

رد الفعل الناتج عن الحمولة الميتة:

$$R_g = \frac{G_{sh} \times L}{2} = \frac{24.79 \times 5.2}{2} = 64.4kN$$

رد الفعل الناتج عن الحمولة الحية:

$$R_q = \frac{Q_{sh} \times L}{2} = \frac{5 \times 5.2}{2} = 13kN$$

الحمولات الكلية على الجائز B_2 :

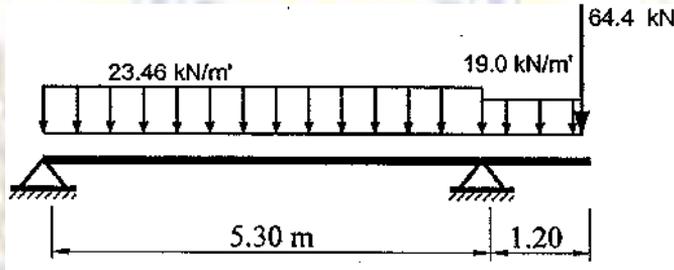
1- الحمولة المكافئة الميتة من أجل الانعطاف:

○ بين المسندين:

$$g_b = SW + Slab + Wall = 2.81 + 9.33 + 11.31 = 23.46kN/m$$

○ جزء الظفر:

$$g_b = SW + Slab + Wall = 2.81 + 3.15 + 13.05 = 19.01kN/m$$



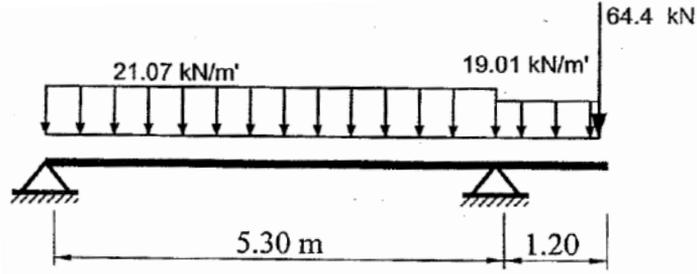
2- الحمولة المكافئة الميتة من أجل الجهد القاطع:

○ بين المسندين:

$$g_{sh} = SW + Slab + Wall = 2.81 + 9.33 + 8.93 = 21.07kN/m$$

○ جزء الظفر:

$$g_{sh} = SW + Slab + Wall = 2.81 + 3.15 + 13.05 = 19.01kN/m$$



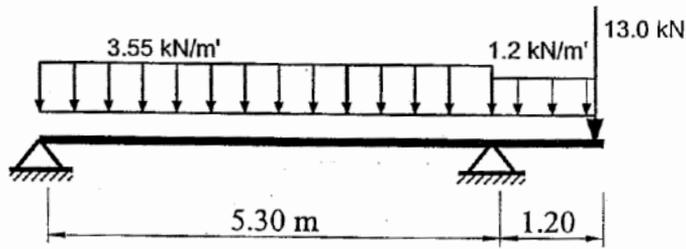
3- الحمولة المكافئة الحية من أجل الانعطاف والجهد القاطع، بما أن الحمولة المكافئة للبلاطة محسوبة بطريقة المساحة المكافئة فهي تستخدم لكل من القص والانعطاف:

○ بين المسندين:

$$q = \text{Slab} = 3.55 \text{ kN} / \text{m}$$

○ جزء الظفر:

$$q = \text{Slab} = 1.2 \text{ kN} / \text{m}$$



مثال تطبيقي (4-9):

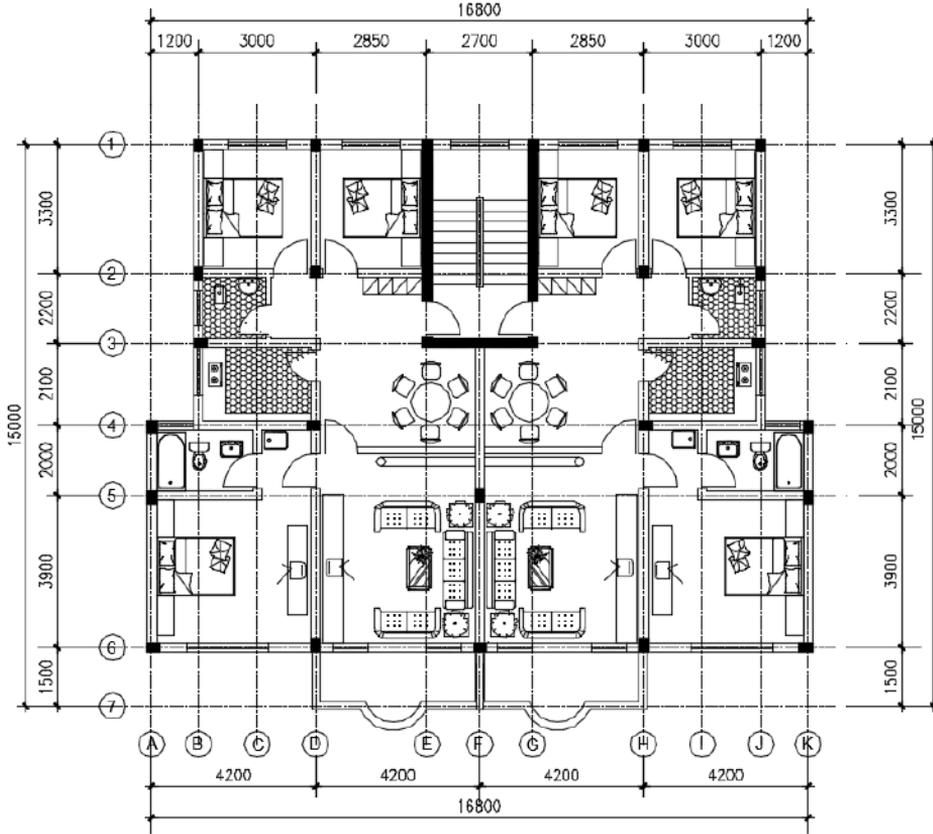
بيّن الشكل المجاور مسقطاً معمارياً Architectural Plan لطابق متكرر في مبنى سكني،

والمطلوب:

1- ارسم النظام الإنشائي للطابق باعتباره جيزان أعمدة.

2- ارسم الحمولات المنقولة من البلاطات إلى الجيزان.

- 3- ارسم الحمولات المطبقة على الجائز البسيط B_1 ، وذلك وفقاً للمحاور (A)، (B)، (C)، (D)، والمحور (4) والجائز المستمر B_2 وفق المحاور (1)، (2)، (3)، (4) والمحور (B).



الشكل (9-37) مسقط معماري لطابق متكرر في مبنى سكني

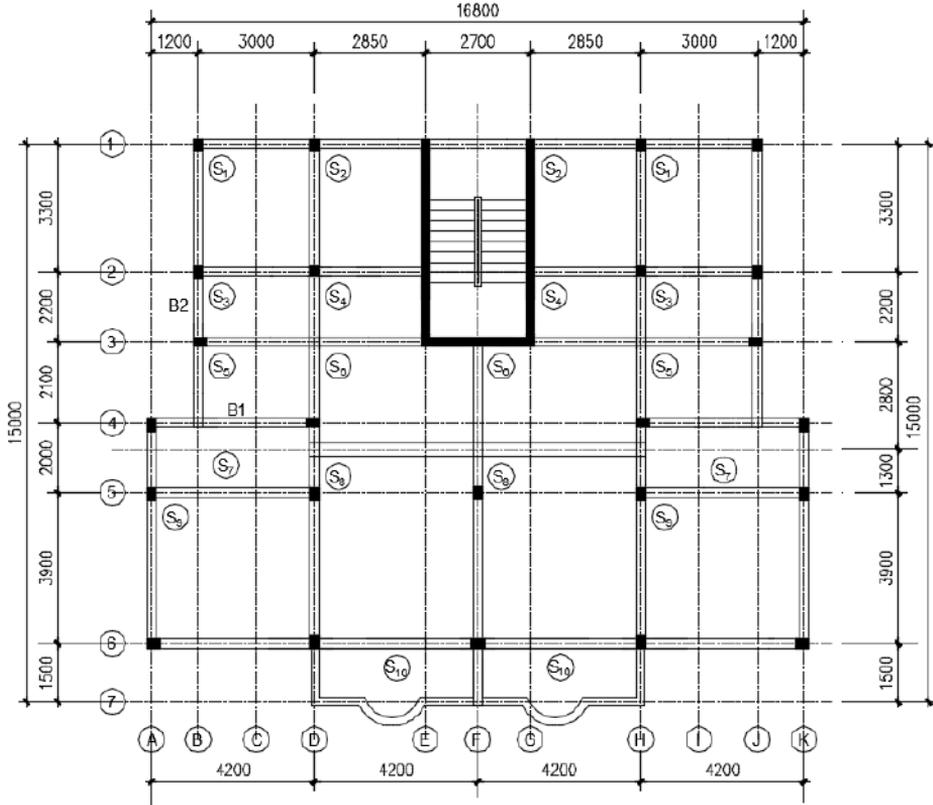
الحل:

من أجل رسم المخطط الإنشائي تُراعى النقاط التالية:

- 1- هناك شرفتان متناظرتان في المسقط كلاهما تعمل بشكل ظفري Cantelever Slab نظراً لأنَّ البعد القصير 1.5m صغير بالنسبة للبعد الطويل 4.2m.
- 2- لا بد من وجود جائز يفصل غرفة الطعام عن غرفة الجلوس ونظراً لأنه غير محمول على أعمدة يجب تحميله بشكل ثانوي على الجيزان المجاورة المعامدة والجائز الواقع على محور التناظر.
- 3- أيضاً هناك حاجة لوجود استناد ثانوي:

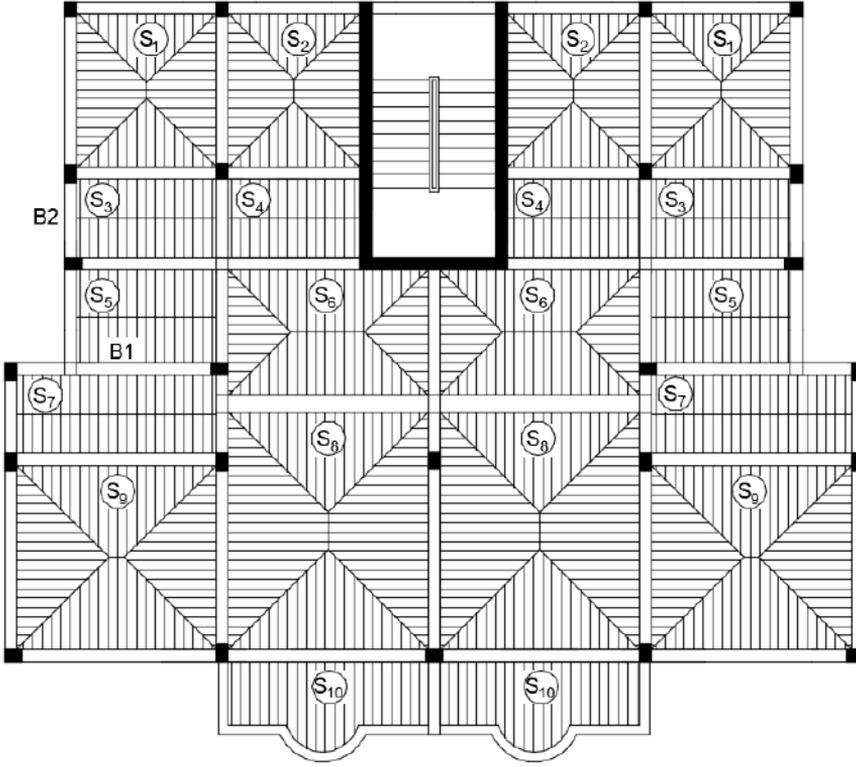
- عند تقاطع المحور (3) والمحور (D)، ونظيره عند تقاطع المحور (3) والمحور (H).
- عند تقاطع المحور (5) والمحور (D)، ونظيره عند تقاطع المحور (5) والمحور (H).

ويكون المسقط الإنشائي كما يلي:

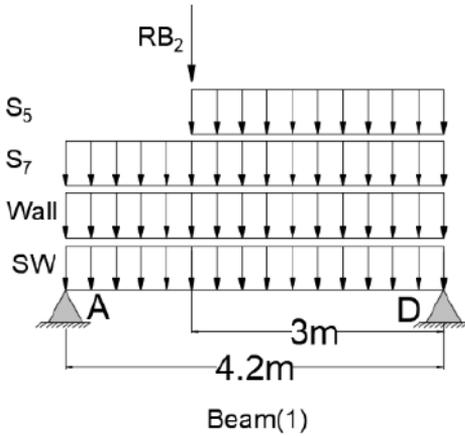


الشكل (9-38) المسقط الإنشائي لطابق متكرر في مبنى سكني

اتجاه عمل البلاطات ونقل أحمال البلاطات إلى الجيزان مبين بالشكل (9-39):

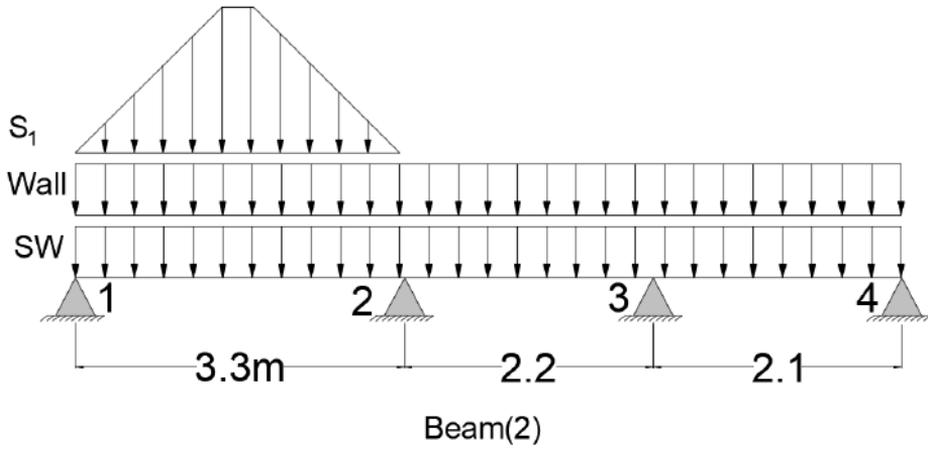


الشكل (9-39) توزيع أحمال البلاطات

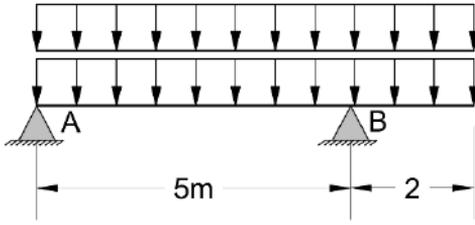


إنَّ الأحمال على الجائز B_1 تتضمن كل من وزنه الذاتي ووزن الجدار فوقه بالإضافة إلى نصف حمل البلاطة S_7 العاملة باتجاه وحيد، وهو مستمر على كامل الجائز ونصف حمل البلاطة S_5 ويستمر على مسافة قدرها 3m من الجائز. بما أن الجائز B_2 يستند على الجائز B_1 عند تقاطع المحورين (4) و (B) فإن الجائز B_1 يحمل رد فعل الجائز B_2 عند هذه النقطة.

إنَّ الجائز B_2 يخضع إلى كل من وزنه الذاتي وحمل الجدار الذي فوقه، بالإضافة إلى حمولة البلاطة S_1 حيث أنه لا يحمل شيئاً من حملي البلاطتين S_3 و S_5 لأنَّهما تعملان باتجاه وحيد ومحمولتان على الجيزان الموازية للمحور x .



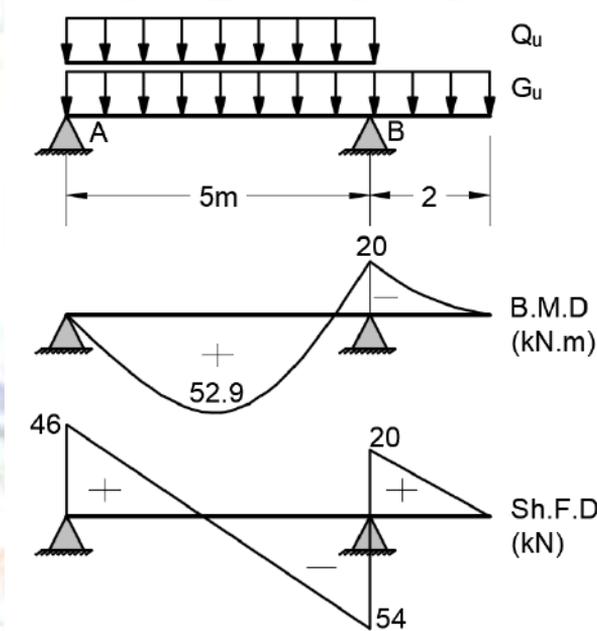
مثال تطبيقي (5-9):



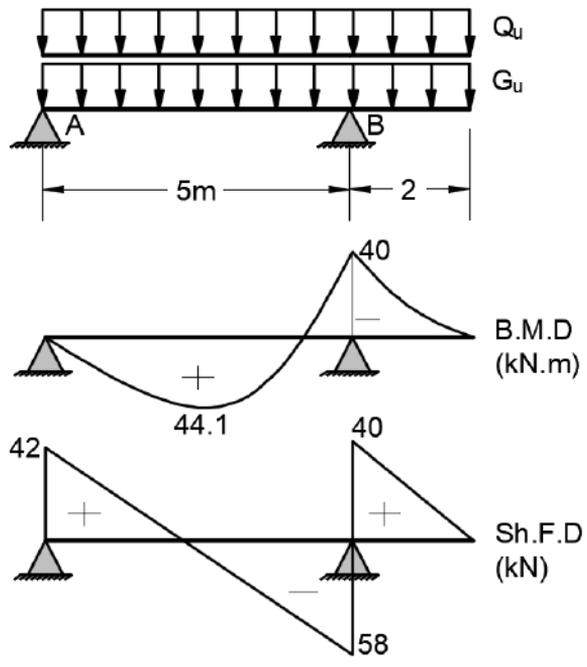
أوجد مغلف العزوم ومغلف الجهد القاطع للجائز المبين بالشكل وفق طريقة التحميل الشطرنجي، علماً أنّ الحمولة الحية تساوي 10kN/m والحمولة الميتة تساوي 10kN/m .

الحل:

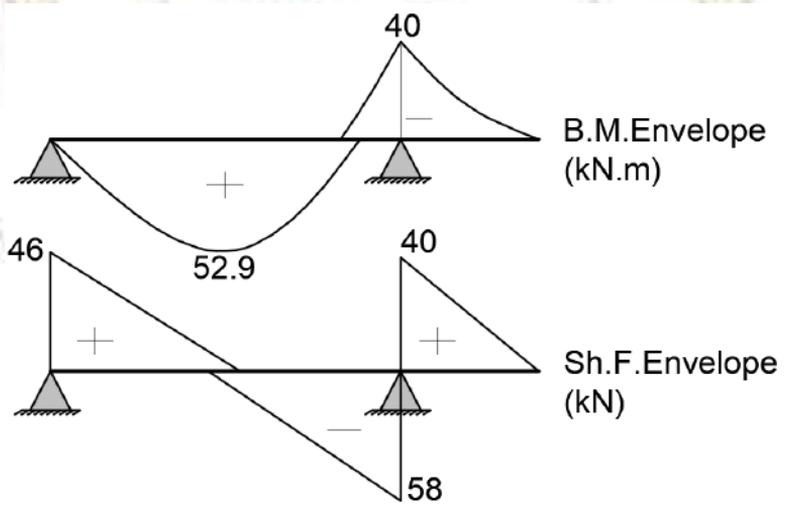
1- العزم الموجب الأعظمي في منتصف المجاز AB: يكون التحميل كما في الشكل التالي:



2- لإيجاد العزم الموجب الأعظمي في المسند B ورد الفعل الأعظمي في المسند B، وكذلك القوة القاصة يمين ويسار المسند يحمل المجاز AB والمجاز المجاور بكامل الحمولات الميتة والحية.



بجمع كلا المخططين يتم الحصول على مغلف العزوم Bending Moment Envelope:





المراجع

1. الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت بالخرسانة المسلحة - نقابة المهندسين، 2015.
2. نادر نبيل أنيس- البيتون المسلح، نقابة المهندسين 1990.
3. ACI 318-19 (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete*. American Concrete Institute.
4. Nasr Abboushi, (2014). *Reinforced Concrete*. Palestine: Palestine Polytechnic University.
5. David Darwin, et al. (2016). *Design of Concrete Structures*. New York: McGraw Hill.
6. M. Nadim Hassoun, et al. (2015). *Structural Concrete Theory and Design*. New Jersey: Wiley.
7. Mahmoud E. Kamara, et al. (2011). *Simplified Design of Reinforced Concrete Building*. Illinois: PCA.
8. Mashhour Ghoneim, et al. (2008). *Design of Reinforced Concrete Structure*. Cairo.
9. Ray, S. S. (1995). *Reinforced Concrete Analysis and Design*. London: Blackwell Science Ltd.
10. Konstantinidis, Apostolos (2008). *Earthquake Resistant Buildings from Reinforced Concrete*. Athens: Alta Grafico.



دليل المصطلحات العلمية

عربي - انكليزي

A

Alternative Method	طريقة بديلة
Absolute maximum moment (M)	عزم الانعطاف (الانحناء) الأعظمي
Allowable-stress	الإجهاد المسموح
Angular displacement	تشوه زاوي
Antisymmetric loads	أحمال متناظرة عكسياً
Approximate methods of analysis	طرائق تحليل تقريبية
Areas of reinforcing steel	مساحات التسليح
Axial compression	ضغط محوري
Axial Tension	شد محوري
Average	متوسط
Applied force	قوة مطبقة
Action	فعل
Assembly	عناصر مجمعة

B

Bay	مجاز
Beam	جانز
Bending moment	عزم انعطاف
Bending moment diagram	مخطط عزم الانعطاف
Buckling	تحنيب
Biaxial bending	عزم منحرف
Bond	التحام
Bar	قضيب
Base	أساس
Basic Method	طريقة أساسية

C

Creep	زحف
Cantilever	ظفر
Cantilever beam	جانز ظفري
Column	عمود
Compatibility	توافقية
Capital	تاج العمود
Compressive force	قوة ضغط
Concrete	خرسانة
Curvature	انحناء
Concentrated loads	قوى مركزة
Circular	دائري

Codes	كودات
Continuity conditions	شروط الاستمرارية
D	
Dead loads	أحمال ميةة
Deflection	تشوه
Determinacy	تقرير
Displacements	انتقالات
Distributed loads	أحمال موزعة
Deep beam	جانز عميق
Design loads	حمولات تصميمية
Detailing	تفاصيل تسليح
Diagonal	قطري
Design	تصميم
E	
Effective Depth	ارتفاع فعال
Effective flange width	عرض الجناح الفعال
Elements	عناصر
Expansion	تمدد
Equilibrium	توازن
External stability	استقرار خارجي
Eccentric compression	ضغط لا مركزي
Effect	تأثير
F	
Fixed-end moments (FEM)	عزوم وثق
Flanges	أجنحة الجيزان
Flexibility	قابلية تشوه
Flexural rigidity	صلابة انعطافية (انحنائية)
Floors	أرضيات
Force	قوة
Frames	إطارات
Fixed-support	وثاقة
Free-body diagrams	مخطط الجسم الحر
G	
Girder	جانز مستعرض
Gross moment of inertia	عزم العطالة غير المتشقق
H	
Hinge	مفصل
I	
Inflection points	نقاط انعطاف

Interaction diagram	مخطط ترابط
Inclined cracking	تشققات قطرية
Impact	تأثير
Internal stresses	إجهادات داخلية
Internal stability	استقرار داخلي
Initial modulus	معامل أولي
Instable	غير مستقر
Instability	عدم استقرار
J	
Joint	عقدة
L	
Lateral loads	قوى جانبية
Line	خط
Limit State	حالة حدية
Load Factors	عامل حمولة
Longitudinal reinforcement	تسليح طولي
Live Load	حمل حي
Loads	أحمال
M	
Magnification factor	عامل تصعيد
Middle strip	شريحة وسطية
Modes of failure	أنماط الانهيار
Moment distribution	توزيع العزوم
Moment of inertia	عزم العطالة
Moving loads	أحمال متحركة
N	
Neutral Axis	محور محايد
Nominal strength	مقاومة اسمية
P	
Plastic hinge	مفصل لدن
Prestress	مسبق الإجهاد
Post-tensioning	لاحق الشد
Portals	إطارات
Plastic centroid	مركز المقطع البلاستيكي
Pile caps	قبعة الأوتاد
Pattern Loading	نموذج تحميل
Principle of Superposition	مبدأ تنضد الأثار
R	
Reinforcing-Reinforcement	تسليح

Rectangular section
Radius of gyration

مقطع مستطيل
نصف قطر العطالة

S

Stress block
Shear wall
Simplified analysis
Serviceability
Shear
Stirrups
Slenderness ratio
Shrinkage
Singly reinforced section
Spandrel beam
Spacing
Slabs
Span
Stability
Strength reduction factor
Stresses
Support

الإجهاد
جدار قص
تحليل مبسّط
حدود الاستمرار
قص
أساور
نسبة النحافة
انكماش
مقطع أحادي التسليح
جائز رابط
تباعد
بلاطات
مجاز
استقرار
معامل تخفيض المقاومة
الإجهادات
استناد

T

Temperature (T)
Thickness
Torsion
Transverse reinforcement
Two-way slabs
T-section

درجة حرارة
سماعة
فتل
تسليح عرضي
بلاطة تعمل باتجاهين

U

Uniform loads
Units
Ultimate State

أحمال موزعة بانتظام
واحدات
حالة حدّية

V

Vertical components
Virtual work
Vertical loads

عناصر شاقولية
عمل افتراضي
أحمال شاقولية

W

Webs
Wind loads

جذع الجائز
أحمال رياح



التدقيق العلمي

الدكتور
محمد بسام كنجو
جامعة حلب

الأستاذ الدكتور
غسان سليم القدور
جامعة حلب

الأستاذ الدكتور
بسام حويجة
جامعة تشرين

المدقق اللغوي

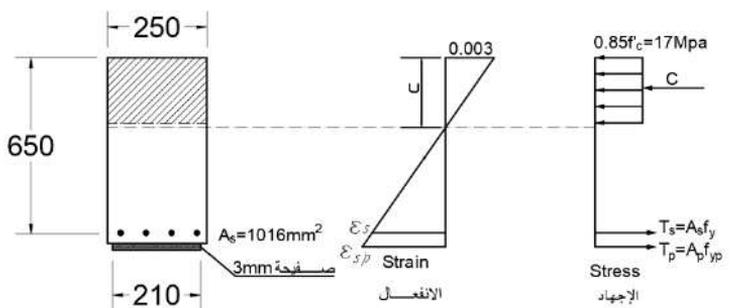
الدكتور رمضان إبراهيم إبراهيم

حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة

لمديرية الكتب والمطبوعات الجامعية



Reinforced Concrete (1)



Dr. Rim KHARTASH

Assistant Professor - Structural Engineering Department

Third Year

Academic Year 1444-2023 هـ

سعر المبيع للطلاب