3- تصميم مقاطع البيتون المسلح وفقاً للحالة الحدية القصوى (الكود السوري الأساس)

3-1- مقدمة -عموميات:

درجت العادة في حساب البيتون المسلح على تشغيل العناصر الإنشائية المختلفة بإجهادات أقل مما تستطيع موادها مقاومته، وذلك للأخذ بالحسبان مجموعة من العوامل السيئة أو الطارئة التي يمكن أن تتضافر وتلتهم هذا الفائض في المقاومة، دون أن يؤدي ذلك إلى انهيار المنشأة أو تصدعها، أو حتى إلى ظهور أية عيوب فيها.

مبدئياً نستطيع أن نقول: إن تشغيل عنصر إنشائي بإجهادات صغيرة يزيد في درجة الأمان فيه، إلا أن هذا الأمر يصطدم بعقبة الكلفة الاقتصادية، مما يستلزم ضرورة تحقيق توازن بين هذه الكلفة وبين درجة أمان معقولة وفقاً لاعتبارات مختلفة يستبعد فيها أحياناً بعض العوامل نادرة الحدوث، أو الظروف القاهرة والاستثنائية، والتي يتبع تقديرها إلى المهندس تبعاً لأهمية المنشأة، ولما يسبب انهيارها من أضرار مادية وبشرية وردود أفعال نفسية، وأهم تلك الاعتبارات هي:

أ. فداحة نتائج الانهيار من الناحيتين البشرية والاقتصادية.

ب. شروط التحميل بما في ذلك الاعتبارات التي تخص حالات التحميل المختلفة.

ت. مستوى التنفيذ والبناء.

ث. أهمية العنصر الإنشائي في المنشأة.

ج. طبيعة الإنذار عن قرب حدوث الانهيار.

ح. ضعف المقاومة، وما يستلزمه تأمين صيانة كافية للمنشآت.

نستنتج من هذا أن مسألة الأمان في المنشآت بصورة عامة هي إحدى المسائل التي تستوجب الاستعانة بالطرائق الإحصائية لحلها. إلا أنه كان الاتجاه في الماضي إلى استعمال الإحصائيات في دراسة الأمان بالنسبة للمهندس العادي، أقل وضوحاً من الاتجاه إلى التوسع باستعمال الإحصائيات في تدقيق صفات البيتون الذي يصنع في الورشة، وقد أصبح الآن استعمال الإحصائيات في تعيين معايير التصميم ذا أهمية كبرى، ولكن لابد من التنويه إلى أنه يخشى من الوصول إلى نتائج مغلوطة وغير دقيقة إذا لم يعتدل في استعمال الرياضيات في هذا المجال، وذلك بالاعتماد على الخبرة العملية والمنطق السليم.

كما يجب الإشارة هنا إلى أن الأمان المطلق غير موجود بعكس ما يعتقد، حيث يقبل الإنسان بصورة طوعيه احتمالاً غير مهمل للحوادث الطارئة، إذ إن غياب المجازفة نهائيا يعتبر أمراً صعباً جداً إن لم نقل مستحيلاً، وبصورة خاصة في مجال الإنشاءات، حيث يتدخل إضافة إلى الاستقرار ضد الانهيار، أمورً أخرى أهمها: الديمومة وقابلية الاستخدام

التي لم تعر أي اهتمام حتى نهاية القرن الثامن عشر، على الرغم من أن الأمان شغل عقول الإنشائيين منذ فجر التاريخ، وأكبر دليل على ذلك (كود حمورابي). كما تعتبر حوادث التصدع أو حتى الانهيارات التي تطرأ على المنشآت التي التزم في تشييدها بالقواعد المعروفة، برهانا على الطابع الكيفي للأمان.

ومن نواحي أخرى، يرتبط الأمان باعتبارات ذات أهمية اقتصادية وسياسية وحتى أخلاقية، حيث نعرف أن احتمال انهيار منشأة يتناقص بازدياد كلفتها، وكذلك يمكن نظرياً تصغير درجة أمان المنشآت بحيث يتم التوصل إلى كلفة أصغريه لمجمل المنشأة. ولكن وجود خطر الحوادث الجسدية، يؤدي إلى تدخل اعتبارات على الصعيد الأخلاقي والتي لا يمكن إهمالها.

أخيرا على الصعيد السياسي، نلاحظ في بعض الدول النامية، التي لم تستكمل بعد حاجتها الأولية، أنه يعتمد مستوى أمان أخفض من دولة غنية، وذلك في سبيل تأمين المساكن اللازمة للناس بأقل كلفة وبأسرع وقت.

من الجدير بالذكر أنه ليس هناك من ارتباط واضح بين طبيعة ودرجة الأمان في منشأة من البيتون المسلح، وبين الأمان في مختلف عناصره الإنشائية، حيث يعتمد ذلك على طبيعة الجهود المؤثرة في تلك العناصر وعلى خضوع مختلف المقاطع لتلك الجهود، كما يتعلق الأمان في منشآت البيتون المسلح بصورة رئيسية بقابلية البيتون للتكيف تحت تأثير الحمولات المفرطة، وذلك عن طريق حدوث إعادة توزيع للجهود أكثر ملاءمة من التوزيع الأول، مع ملاحظة أن ظاهرة التكيف هذه التي يتجلى البيتون المسلح بها، غالبا ما تحدث بصورة تفوق في فعاليتها جميع التوقعات.

3-2- أهمية الأمان في منشآت البيتون المسلح:

تنبثق أهمية الأمان في منشآت البيتون المسلح مما يسمى "فجائية الحوادث"، إذ لا يوجد ما ينذر عن قرب تجاوز حمولات الإنذار والإجهادات المرنة، وبالتالي عن قرب حدوث الانهيار، بحيث قد يؤدي التصدع الجزئي للمنشأة إلى الانهيار التام فيما إذا ثابرت الحمولات على الزيادة. ولكن على الرغم من أن الحوادث التي قد تصاب بها منشآت البيتون المسلح بصورة عامة، غالبا ما تكون فجائية بحيث يكون من الصعب التنبؤ عن قرب حدوثها، إلا أنه من العدل أن نقول: إن أسباب الحوادث الخطيرة التي قد تصيب منشآت البيتون المسلح، لا تعود في أغلب الأحيان إلا لارتكاب أخطاء كبيرة وخطيرة في تطبيق قواعد البناء الأساسية.

3-3- مفهوم الأمان في حساب البيتون المسلح على أساس الإجهادات المسموحة:

تعتمد طريقة الحساب هذه على تشغيل العناصر الإنشائية المختلفة بإجهادات أقل مما تستطيع موادها مقاومته، ويعود السبب في ذلك إلى احتمال تضافر العديد من العوامل السيئة التي يقبل أن تستهلك الفائض في الإجهادات،

دون أن يؤدي ذلك إلى انهيار العنصر الإنشائي أو إلى ظهور تصدعات أو عيوب فيه. كما يعود السبب إلى عدم التمكن من إدخال تلك العوامل السيئة في الحساب بصورة مباشرة، والتي تتعلق بما يلي:

- ظروف الاستخدام الفعلية للمنشأة.
- العوامل الجوية.
- خواص التربة ومواد البناء.
- الجهود المأخوذة بعين الاعتبار الجهود المهملة.
- طرائق الحساب وفرضياتها المبسطة.
- أخطاء الحساب المحدودة طبعا – أخطاء التنفيذ المعقولة.
- شروط الحفظ والصيانة.
- قدم و اهتراء المواد.
- التحولات اللاحقة.

وكذلك لا تعفي حدوث الكوارث كأسباب قاهرة، مختلف المشاركين في المنشأة من مسؤولياتهم.

ومن الجدير بالذكر أن كون الفولاذ أكثر تجانساً من البيتون، وبسبب الضمانات التي تعطيها المصانع، يمكن تشغيل الفولاذ على إجهاد يصل إلى ثلثي حد المرونة، علماً بأن إجهاد التشغيل هذا لا يحدده فقط الأمان ضد انقطاع الفولاذ، وإنما تشقق البيتون المشدود الذي يتحتم حدوثه اعتبارا من مقاومة للفولاذ على الشد تقدر بحوالي 100MPa، ويعني هذا أن التطاول النسبي الأعظمي على الشد الذي يستطيع البيتون تحمله لطالما بقي التلاحم قائما بينه وبين الفولاذ، بتطبيق قانون "هوك"، هو:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{100}{2{,}1\times 10^5}$$

باعتبار أن:

σ_s : إجهاد التشغيل في الفولاذ، E_s: عامل مرونة الفولاذ.

إذ يحصل اعتبارا من تلك القيمة تشققات صريحة في البيتون.

3-4- مفهوم الأمان في حساب البيتون المسلح على أساس الحالات الحدية:

الحالة الحدية عبارة عن حالة خاصة يؤدي الخروج عنها إلى جعل المنشأة أو جزء منها يكف عن القيام بوظيفته المصمم من أجلها، أو أن تصبح الشروط المتعلقة بسلوكها الإنشائي غير مقبولة.

إن طرائق حساب البيتون المسلح على أساس الحالات الحدية هي طرائق حديثة، تسعى إلى مجانسة عوامل الأمان، وإلى الاعتماد على التفسير الإحصائي.

ويمكن تصنيف الحالات الحدية التي يمكن مصادفتها بالنوعين التاليين:

- الحالات الحدية القصوى: وهي الحالات التي توافق انهيار المنشأة أو أحد عناصرها.

- الحالات الحدية المتعلقة بالاستثمار: وهي الحالات التي تصبح المنشأة اعتباراً منها غير محققة للشروط العادية للاستخدام أو لشروط الديمومة.

تقضي طرائق الحساب هذه، أن يتم تصميم المنشآت أو العناصر الإنشائية التي تتألف منها، بحيث يكون باستطاعتها أن تقاوم بكل أمان جميع الأفعال والتأثيرات المحتملة خلال الفترة التي تبنى فيها تلك المنشآت أو أثناء الزمن المخصص لاستثمارها.

كما تنحصر غاية الحساب في ضمان درجة معينة من الأمان ضد وضع المنشأة أو أحد عناصرها خارج الخدمة، علما بأنه توضع منشأة ما خارج الخدمة عندما يكف عنصر فيها أو عدة عناصر أو جميعها، عن تأدية الدور الذي صممت من أجله، هذا وقد يكون السبب في الوضع خارج الخدمة أحد العوامل التالية:

أ. الانكسار أو التغير اللدن المفرط.

ب. التحنيب بسبب عدم الاستقرار المرن أو اللدن.

ت. فقدان التوازن الستاتيكي، الذي يتميز بانتقال المنشأة أو أحد عناصرها انتقالاً غير طبيعي.

ث. عدم الاستقرار الديناميكي.

ج. التغير اللدن المفرط.

ح. التشقق المفرط.

من أجل منشأة ما يقابل كل سبب من هذه الأسباب، حالة خاصة تعرف باسم "الحالة الحدية"، وترتكز طرائق الحساب بصورة عامة، على مبدأ يقضي بالأخذ بعين الاعتبار كل حالة حدية متوقعة، بتعيين عامل أمان خاص بما يناسبها.

في النتيجة يمكن القول: إنه يمكن بلوغ حالة حدية ما عن طريق تضافر العديد من العوامل السيئة بصورة عشوائية، والتي يمكن إدخالها في الحساب على الشكل التالي:

- **أن تضرب** الحمولات بعوامل زيادة تبعا للحالة الحدية المدروسة من شأنها الأخذ بعين الاعتبار:

- عدم تأكد ناجم عن احتمال تدخل عوامل قاهرة، أو غير متوقعة، أو الذي ينجم أيضا عن إهمال الاحتمالات الصغيرة التي تستبعد أن يتم تطبيق جميع الأفعال والحمولات بقيمها العظمى وبآن واحد.

- عدم تأكد إضافي يتعلق بالمقاومات الفعلية للمواد التي تصنع منها المنشأة.
- عدم تأكد ناجم عن التقريبات التي لا يمكن تجنبها في فرضيات الحساب، أو الناجمة عن عدم دقة القياسات والأبعاد، أو عدم التقيد بالشكل الهندسي للعناصر الإنشائية أثناء التنفيذ.

- **أن تضرب** المقاومات للمواد بعوامل الإنقاص، التي يمكن استنتاجها من التفسير الإحصائي، والتي من شأنها الأخذ بعين الاعتبار:

- عدم تأكد ناجم عن عدم الدقة في تقدير الحمولات التي تخضع لها المنشأة.
- عدم تأكد ناجم عن بعثرة نتائج قياس المقاومات التي يتم إجراؤها على المختبرات.

3-5- التصميم وفقاً للحالة الحدية القصوى:

3-5-1- الفرضيات الأساسية للحالة الحدية القصوى

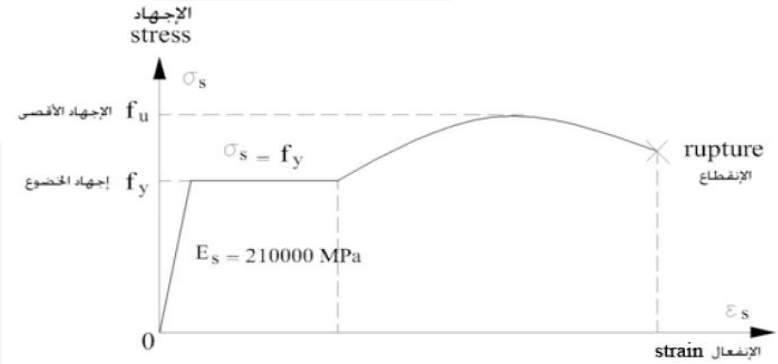
تعتمد الفرضيات التالية:

1- المقاطع المستوية قبل الانعطاف تظل مستوية بعده، أي أن التشوهات في البيتون وفولاذ التسليح تتناسب بشكل خطي مع البعد عن المحور المحايد.

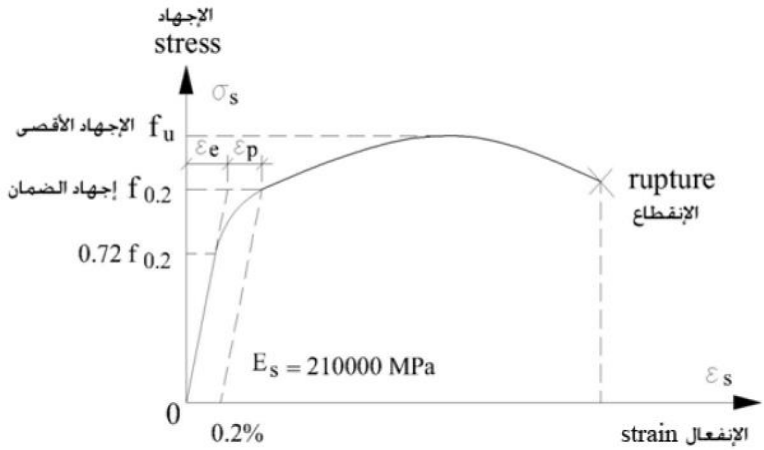
2- تهمل مقاومة البيتون للشد، ويقاوم فولاذ التسليح كافة إجهادات الشد.

3- يؤخذ التشوه الأقصى في ليف البيتون الأكثر انضغاطا مساويا لـ (0.003).

4- تعتمد المنحنيات التالية لتحديد تغيرات إجهادات الشد والضغط لفولاذ التسليح مع تغير التشوهات ، (الشكل 3-1 و 3-2):



الشكل (3-1): المنحني الافتراضي للإجهاد والتشوه للفولاذ المطاوع وعالي المقاومة المعالج على الساخن



الشكل (3-2): المنحني الافتراضي للإجهاد والتشوه للفولاذ عالي المقاومة المعالج على البارد

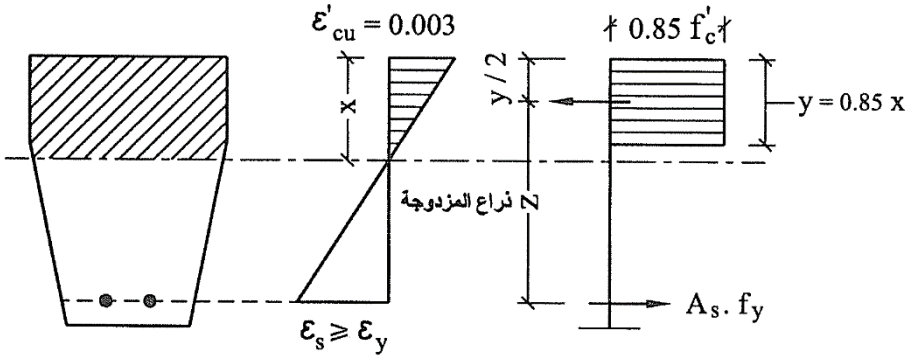
ملاحظة مهمة (كود سوري):

يتم في مناطق الزلازل، اختيار فولاذ تسليح ذو مقاومة مميزة (حد خضوع للشد) لا تتجاوز $f_y = 400MPa$ ولا تقل عن $f_y = 240MPa$. في حال زادت قيمة حد المرونة (حد الخضوع الاصطلاحي) للفولاذ المختبر على 400MPa، فيتم قبوله شريطة:

- أن تكون مقاومة كل عينة للانقطاع لا تقل عن 1.25 مرة حد المرونة للعينة ذاتها (حد الخضوع الاصطلاحي أو حد الضمان).
- لا تزيد نسبة العينات التي يزيد حد مرونتها على 460MPa على 5% من مجموع العينات المختبرة عندما يزيد عدد العينات على 30 عينة.
- في حال اختبار عينتين فقط، فيُسمح للتبسيط بأن يكون حد مرونة إحدى العينتين فقط فوق 460MPa.
- إذا تعدى حد مرونة للعينتين القيمة 460MPa، يتم اختبار أربع عينات أخرى، ولا يسمح بأن يزيد حد المرونة على 460MPa سوى لعينة واحدة من العينات الأربع.

5- يفترض الكود السوري أنه بالإمكان توزيع الإجهادات في منطقة الضغط من المقطع البيتوني (والذي يكافئ التوزيع الفعلي الناتج عن تجربة مخبرية قياسية) على شكل مستطيل محدد بحافة الألياف المعرضة لأقصى تشوه في منطقة الضغط وبارتفاع مقداره $y = 0.85x$ ، باعتبار x موقع المحور المحايد بالنسبة لهذه الحافة، وتكون قيمة إجهاد الضغط مساوية لـ $0.85\, f'_c$ كما هو مبين في الشكل (3-3).

ملاحظة: عندما تزيد المقاومة المميزة f_c على 30 MPa (300 kgf/cm²) فيلزم تخفيض ارتفاع منطقة الضغط بمقدار 0.05 من أجل كل زيادة بمقدار 7 MPa أو أجزائها. وفي هذه الحالة ستتغير جميع العلاقات المتعلقة بـ y.



مخطط الإجهادات (القوى) مخطط التشوهات المقطع العرضي (تسليح شد)

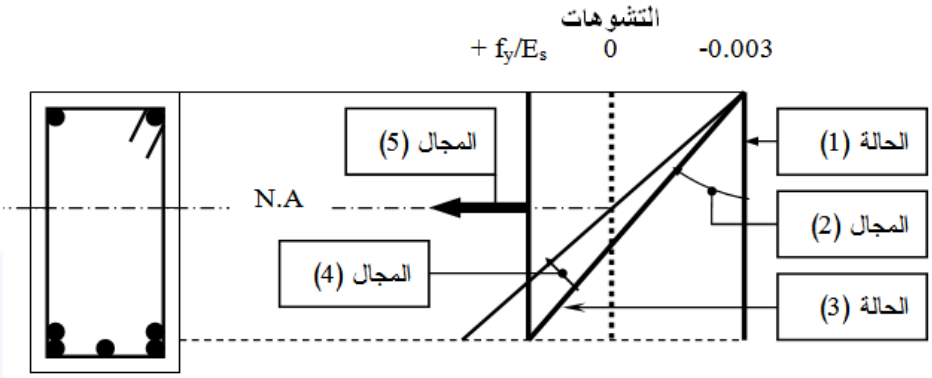
الشكل (3-3): الاجهادات والتشوهات والقوى الناظمية في المقطع

6- القوة الخارجية تساوي محصلة القوى الداخلية، وفي حال الانعطاف البسيط تكون القوة الخارجية معدومة، بالتالي تكون قوة الشد في الفولاذ مساوية لقوة الضغط في البيتون وفي تسليح الضغط إن وجد.

7- العزم الخارجي عند محور ما، يساوي مجموع عزوم القوى الداخلية الناتجة عن الاجهادات في المقطع، أي محصلة عزوم قوة الشد في الفولاذ والضغط في البيتون، وتسليح الضغط إن وجد.

3-5-2- أشكال الانهيار المحتملة:

يبين الشكل (3-4) حالات انهيار العناصر البيتونية الخاضعة لتأثير الإجهادات الناظمية:



الشكل (3-4): أشكال الانهيار المختلفة (الحالة الحدية القصوى)

الحالة (1): تمثل حالة انهيار العناصر المضغوطة مركزيا (الضغط البسيط – أعمدة قصيرة)، ويكون مخطط التشوهات موزعاً بانتظام على كامل المقطع (البيتون وفولاذ التسليح) بقيمة مساوية لـ 0.003 .

المجال (2): يمثل حالات انهيار العناصر المضغوطة بلامركزية صغيرة، أو المقاطع المعرضة للانعطاف ذات مساحات تسليح تزيد عن المساحة التوازنية A_{sb} ، ويكون التشوه الأقصى في البيتون المضغوط مساويا لـ: 0.003 ، أما التشوه الأقصى في التسليح المشدود فيساوي: $\varepsilon_s = \frac{f_s}{E_s} < \varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$

الحالة (3): تمثل حالة الانهيار التوازني، ويبلغ التشوه الأقصى في فولاذ التسليح المشدود القيمة المقابلة لتشوه الخضوع المساوي إلى $\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$ في نفس اللحظة التي يبلغ فيها تشوه البيتون المضغوط قيمته القصوى 0.003 .

المجال (4): يمثل حالات انهيار العناصر المضغوطة بلامركزية كبيرة، أو المقاطع المعرضة للانعطاف ذات مساحات تسليح تقل عن المساحة التوازنية A_{sb} ، ويكون التشوه الأقصى في البيتون المضغوط مساويا لـ: 0.003 ، أما التشوه الأقصى في التسليح المشدود فيكون: $\varepsilon_s > \varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$

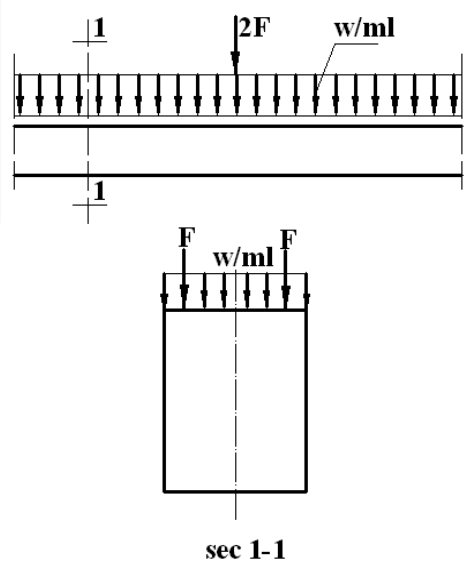
المجال (5): يمثل حالات انهيار العناصر المشدودة مركزيا (شدادات) أو المشدودة بلامركزية صغيرة حيث تقع قوة الشد ضمن المقطع بين مركزي ثقل التسليحين، ويكون التشوه الأقصى عند مركزي ثقل التسليح العلوي والسفلي على السواء $\varepsilon_s \geq \varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$ ، أما المقطع البيتوني فمشدود ومتشقق وتهمل مقاومته حسابيا.

أما حالة الانهيار الناجمة عن الشد بلامركزية كبيرة حيث تقع قوة الشد خارج مركزي ثقل التسليحين فتشبه حالات الانهيار الحدودة في المجال (4) بفارق وحيد وهو أن يصبح التسليح المشدود هو الأقرب من نقطة تطبيق قوة الشد، والتسليح المضغوط هو الأبعد عنها (بعكس حالة الضغط بلامركزية كبيرة).

3-5-3- مخططات القوى الناظمية والاجهادات والتشوهات في المقاطع البيتونية:

- **حالة مقطع مستطيل مسلح بتسليح شد فقط (A_S) (انعطاف بسيط)**

يقال عن مقطع ما بأنه خاضع للانعطاف البسيط إذا أمكن تحويل الجهود المؤثرة عليه إلى مزدوجة ينطبق محورها على محور تناظر المقطع، كما هو مبين في الشكل (3-5).



الشكل (3-5): مقطع ما بأنه خاضع للانعطاف البسيط

يوجد الكثير من الأمثلة للعناصر الخاضعة للانعطاف البسيط في منشآت البيتون المسلح، منها: البلاطات بأنواعها، الجسور والجوائز البسيطة أو المستمرة الخاضعة لحمولات شاقولية، وتكون مقاطعها عادة متناظرة بالنسبة للمحور المار من مستوى الانعطاف كالمقاطع المستطيلة أو بشكل تي (T). باختصار يتعرض مقطع عنصر إنشائي للانعطاف البسيط عندما لا يؤثر عليه أي جهد ناظمي.

يستند الحساب الكلاسيكي المرن للمقاطع المعرضة لعزم انعطاف بسيط إلى جملة من الفرضيات الأساسية، التي تم ذكرها سابقاً، ويمكن تلخيصها كما يلي:

- المقاطع المستوية قبل التشوه تبقى مستوية بعد التشوه.
- إهمال بيتون منطقة الشد وتحميل كامل إجهادات الشد للتسليح المشدود.
- لا تطرح مقاطع التسليح من مقطع البيتون المضغوط.
- يفترض أن مركز ثقل التسليح لمقطع ما ينطبق على مركز ثقل مجموعة القضبان المشدودة أو المضغوطة.

يتم تسليح العناصر الخاضعة للانعطاف البسيط بشكل أساسي في منطقة الشد، وقد يضطر المهندس المصمم لوضع قضبان تسليح في منطقة الضغط عندما تتجاوز قيمة العزم الانعطاف المطبق حداً معيناً. فتوجد حالتان عند دراسة المقاطع المعرضة للانعطاف البسيط : مقاطع تحوي تسليح مشدود فقط (مقطع أحادي التسليح) ومقاطع تحوي تسليح مشدود ومضغوط (مقطع ثنائي التسليح).

لدراسة هذا المقطع، تعتمد المبادئ الأساسية بتحقيق شروط التوازن (الشكل 3-6):

- مبدأ توازن القوى:

$$N'_C = N_S$$

$$0.85 f'_c b y = f_y A_s \Rightarrow$$

$$A_s = 0.85 \frac{f'_c}{f_y} b y$$

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

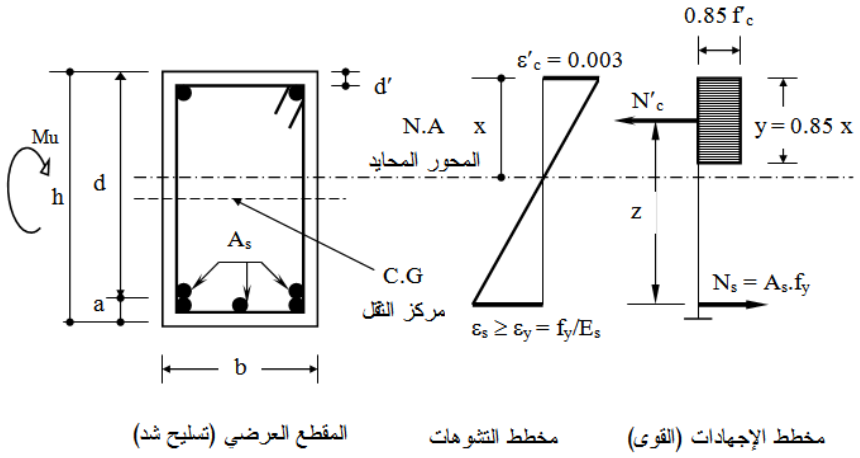
$$\alpha = \frac{y}{d} \Rightarrow \alpha = \mu_s \frac{f_y}{0.85 f'_c}$$

- مبدأ توازن العزوم:

$$M_{uc} = \Omega N'_C Z = \Omega (0.85 f'_c b y)\left(d - \frac{y}{2}\right)$$

$$or$$

$$M_{us} = \Omega N_S Z = \Omega (f_y A_s)\left(d - \frac{y}{2}\right)$$



الشكل (3-6): الاجهادات والتشوهات والقوى الناظمية في مقطع خاضع لانعطاف بسيط

مخطط التشوهات في الحالة التوازنية:

التشوه في فولاذ التسليح المشدود يساوي تشوه الخضوع: $\varepsilon_y = \dfrac{f_y}{E_s}$

التشوه الأعظمي في الليف البيتوني المضغوط: $\varepsilon'_c = 0.003$

من مخطط التشوهات وبالاعتماد على توازن القوى، يمكن تحديد نسبة التسليح التوازنية للمقطع المستطيل أحادي التسليح:

$$\frac{x_b}{d} = \frac{\varepsilon'_c}{\varepsilon_y + \varepsilon'_c}$$

$$E_s = 210000MPa \Rightarrow$$

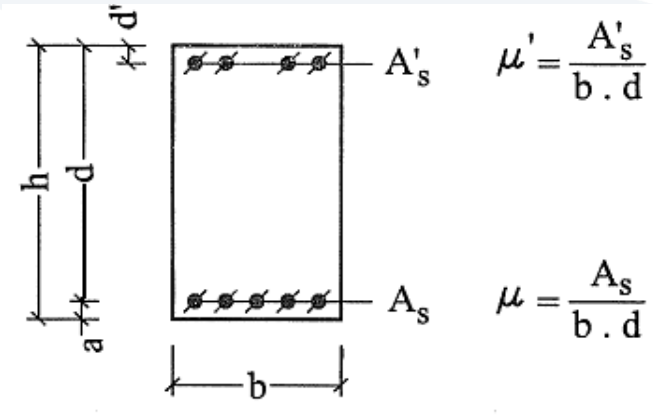
$$\frac{1}{0.85}\frac{y_b}{d} = \frac{0.003}{f_y / E_s + 0.003} = \frac{630}{f_y + 630}$$

$$\Rightarrow \frac{y_b}{d} = \frac{0.85 \times 630}{f_y + 630} = \frac{535.5}{f_y + 630}$$

$$\mu_{sb} = \frac{A_{sb}}{bd} = \frac{1}{bd} 0.85 \frac{f'_c}{f_y} b\, y_b = \frac{y_b}{d} 0.85 \frac{f'_c}{f_y}$$

$$\Rightarrow \mu_{sb} = \frac{0.85 \times 535.5}{f_y + 630} \frac{f'_c}{f_y} \approx \frac{455}{f_y + 630} \frac{f'_c}{f_y}$$

- **حالة مقطع مستطيل مسلح بتسليح شد وضغط (انعطاف بسيط)** (الشكل 3-7)



الشكل (3-7): مقطع مستطيل مسلح بتسليح شد وضغط (انعطاف بسيط)

يمكن تحديد مساحة التسليح التوازنية لهذا المقطع:

$$A_{sb} = \mu_{sb}(bd)$$

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

$$f'_s = 630\left[1 - \frac{d'}{d}\frac{630 + f_y}{630}\right] \le f_y$$

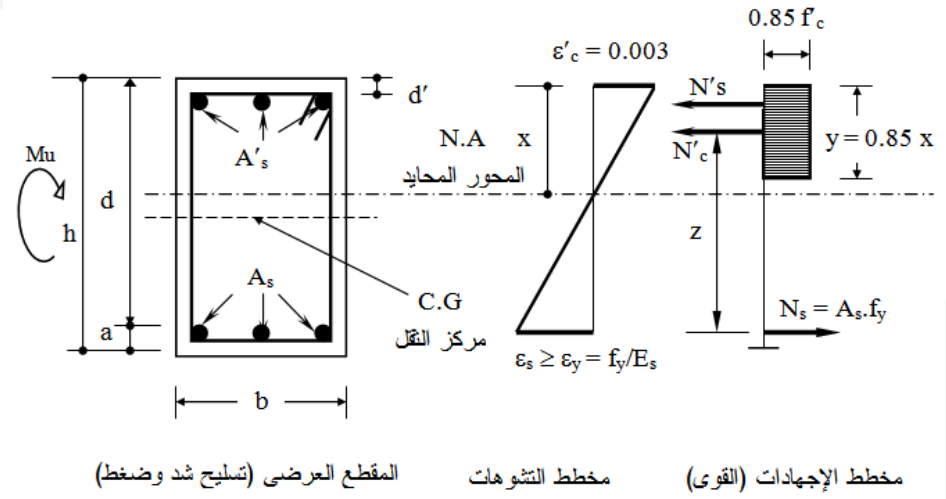
ولدراسة هذا المقطع، تعتمد المبادئ الأساسية المذكورة أعلاه (الشكل 3-8):

- توازن القوى:

$$N'_C = N_S - N'_S \Rightarrow$$
$$0.85 f'_c b y = f_y (A_s - A'_s)$$

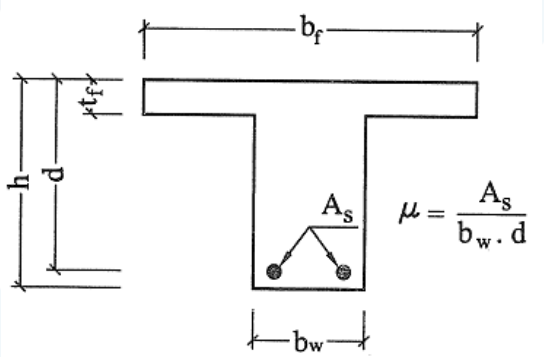
- توازن العزوم:

$$M_u = \Omega N'_C Z + \Omega N'_S (d - d')$$
$$= \Omega\left[0.85 f'_c b y (d - 0.5y) + A'_s f_y (d - d')\right]$$
$$\therefore M_u = M_{u1} + \Delta M_u$$



الشكل (3-8): الاجهادات والتشوهات والقوى الناظمية في مقطع خاضع لانعطاف بسيط

- **حالة مقطع بشكل T مسلح بتسليح شد فقط (انعطاف بسيط)** (الشكل 3-9)



الشكل (3-9): مقطع تي مسلح بتسليح شد (انعطاف بسيط)

لتحديد مساحة التسليح التوازنية، يتم التمييز بين حالتين:

- الحالة الأولى، وفيها يعمل المقطع كمستطيل عندما تتحقق العلاقة التالية:

$$t_f \geq 0.85 \frac{630}{630 + f_y} d$$

وتؤخذ مساحة التسليح التوازنية من العلاقة التالية:

$$A_{sb} = \left[\frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} \frac{b_f}{b_w} \right] b_w d$$

- الحالة الثانية، وفيها يعمل المقطع على أساس T حيث يكون:

$$t_f < 0.85 \frac{630}{630 + f_y} d$$

وتؤخذ مساحة التسليح التوازنية من العلاقة التالية:

$$A_{sb} = \frac{b_w}{b_f}\left[\frac{455}{630+f_y}\frac{f'_c}{f_y} + \frac{0.85 f'_C (b_f - b_w) t_f}{b_w d f_y}\right] b_f d$$

حيث:

b عرض المقطع المستطيل. b_w عرض الجسد للمقطع بشكل T.

b_f العرض الفعال لجناح المقطع بشكل T. t_f سماكة جناح المقطع بشكل T.

h الارتفاع الكلي للمقطع. d الارتفاع الفعال للمقطع.

x البعد بين الطرف الأقصى المضغوط والمحور السليم للمقطع البيتوني المسلح.

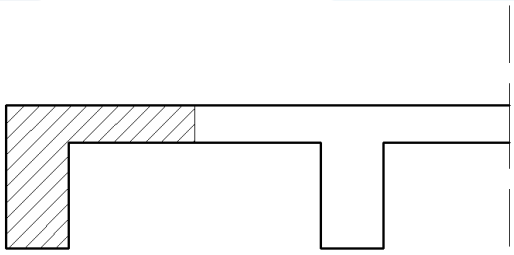
y الارتفاع الاعتباري للمنطقة المضغوطة $(y = 0.85x)$.

A'_s مساحة التسليح المضغوط. A_s مساحة التسليح المشدود.

d' بعد A'_s عن طرف المقطع المضغوط. a بعد A_s عن طرف المقطع المشدود.

- **حالة مقطع بشكل L**

تحسب المقاطع بشكل حرف (L) كما تحسب المقاطع المستطيلة، ويهمل تأثير جناح الضغط (الشكل 3-10).



الشكل (3-10)

7-5-4- علاقات التصميم والتحقيق للمقاطع الخاضعة لانعطاف بسيط

تحدد هذه العلاقات من معادلات توازن القوى والعزوم في المقطع مع الأخذ بالاعتبار نسب التسليح الأصغرية والأعظمية التي ينص عليها الكود السوري، وذلك وفقاً للمقطع وللعنصر المدروس. وعادة تتم صياغة العلاقات بصورة لا بعدية، وتعطى كما يلي:

$$\alpha = \frac{y}{d} = \mu_s \frac{f_y}{0.85 f'_c} \quad ; \quad \gamma = \frac{z}{d} = 1 - 0.5\alpha$$

$$A_0 = \alpha\gamma = \alpha(1 - 0.5\alpha) \quad ; \quad r = \frac{1}{\sqrt{A_0}}$$

وعادة يتم تصميم جدول اعتماداً على قيمة المعامل $\left(\alpha = \frac{y}{d} = \mu_s \frac{f_y}{0.85 f'_c}\right)$ المرتبطة بالمقاومات المميزة للمواد المستخدمة وبنسبة التسليح المفترضة.

- **حالة مقطع مستطيل أحادي التسليح (شد فقط):**

تحدد قيمة الارتفاع الفعال للمقطع من العلاقة: $d = r\sqrt{\dfrac{M_u}{\Omega\, b\,(0.85 f_c')}}$

ويكون زراع الرافعة مساوي لـ: $z = \gamma\, d$

ويتم حساب مساحة التسليح المشدود من العلاقة التالية: $A_s = \dfrac{M_u}{\Omega\, \gamma\, d\, f_y}$ ، وهنا يجب أن تتم المقارنة مع نسب التسليح الحدية (أصغرية وأعظمية) المحددة في الكود:

$$\mu_{s\min} \le \mu_s = \frac{A_s}{b\,d} \le \mu_{s\max} = 0.5\mu_{sb} = 0.5\left[\frac{455}{630+f_y}\frac{f_c'}{f_y}\right]$$

ويحدد العزم المقاوم الحدي لمقطع ما (M_{ur}) (حالة تحقيق) كما يلي:

$$M_{ur} = \Omega\, b\, d^2\,(0.85 f_c')A_0$$

يورد الكود السوري صيغ العلاقات السابقة بصورة لا بعدية، بحيث يمكن استخراج قيم العوامل كاملة بدلالة قيمة معطاة لعامل ما (الجدول 3-1).

α	r	γ	A_o
0.01	10.00	0.995	0.010
0.02	7.12	0.990	0.020
0.03	5.82	0.985	0.030
0.04	5.05	0.980	0.039
0.05	4.53	0.975	0.048
0.06	4.15	0.970	0.058
0.07	3.85	0.965	0.067
0.08	3.61	0.960	0.077
0.09	3.41	0.955	0.085
0.10	3.24	0.950	0.095
0.11	3.11	0.945	0.104
0.12	2.98	0.940	0.113
0.13	2.88	0.935	0.121
0.14	2.77	0.930	0.130

الجدول (3-1): عوامل لابعدية لحساب المقاطع على الانعطاف

α	r	γ	A_o
0.15	2.68	0.925	0.139
0.16	2.61	0.920	0.147
0.17	2.53	0.915	0.155
0.18	2.47	0.910	0.164
0.19	2.41	0.905	0.172
0.20	2.36	0.900	0.180
0.21	2.31	0.895	0.188
0.22	2.26	0.890	0.196
0.23	2.22	0.885	0.203
0.24	2.18	0.880	0.211
0.25	2.14	0.875	0.219
0.26	2.10	0.870	0.226
0.27	2.07	0.865	0.236
0.28	2.04	0.860	0.241
0.29	2.01	0.855	0.248
0.30	1.98	0.850	0.255
0.31	1.95	0.845	0.262
0.32	1.93	0.840	0.269
α	r	γ	A_o
0.33	1.90	0.835	0.275
0.34	1.88	0.830	0.282
0.35	1.86	0.825	0.289
0.36	1.84	0.820	0.295
0.37	1.82	0.815	0.301
0.38	1.80	0.810	0.309
0.39	1.78	0.805	0.314
0.40	1.77	0.800	0.320
0.41	1.75	0.795	0.326
0.42	1.74	0.790	0.332
0.43	1.72	0.785	0.337
0.44	1.71	0.780	0.343
0.45	1.69	0.775	0.349
0.46	1.68	0.770	0.354
0.47	1.67	0.765	0.359

تابع الجدول (3-1): عوامل لابعدية لحساب المقاطع على الانعطاف

α	r	γ	A_0
0.48	1.66	0.760	0.365
0.49	1.64	0.755	0.370
0.50	1.63	0.750	0.375
0.51	1.62	0.745	0.380
0.52	1.61	0.740	0.385
0.53	1.60	0.735	0.390
0.54	1.59	0.730	0.395
0.55	1.58	0.725	0.400

تابع الجدول (3-1): عوامل لابعدية لحساب المقاطع على الانعطاف

- **حالة مقطع مستطيل ثنائي التسليح (شد وضغط):**

$$M_u = \Omega N'_C Z + \Omega N'_S (d-d')$$
$$= \Omega\left[0.85 f'_c b y(d-0.5y) + A'_s f_y (d-d')\right]$$
$$\therefore M_u = M_{u1} + \Delta M_u$$
$$M_{u1} = \Omega b d^2 (0.85 f'_c) A_0 \Rightarrow A_{s1} = \frac{M_{u1}}{\Omega \gamma d f_y}$$
$$\Delta M_u = M_u - M_{u1} = \Omega A'_s f_y (d-d') = \Omega A_{s2} f_y (d-d') \Rightarrow$$
$$A'_s = A_{s2} = \frac{\Delta M_u}{\Omega f_y (d-d')}$$
$$\therefore A_s = A_{s1} + A'_s = A_{s1} + A_{s2}$$

يجب التحقق من وصول فولاذ التسليح المضغوط إلى حد السيلان وفق ما يلي:

$$\varepsilon'_s \geq \frac{f_y}{E_s} \Leftrightarrow y \geq 2d'$$

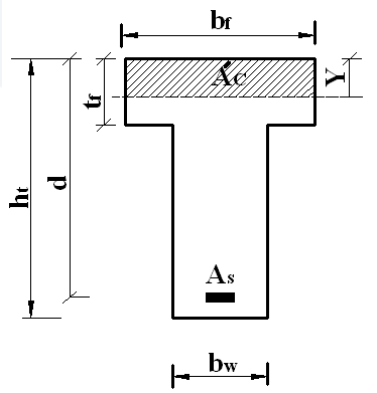
- **حالة مقطع بشكل T :**
  - تحقيق المقطع T :

المعلوم: العزم التصميمي (M_u)، أبعاد المقطع ، التسليح والمقاومات المميزة للبيتون وفولاذ التسليح.

تُميز حالتان:

الحالة الأولى، وفيها يمر المحور السليم ضمن الجناح حيث تكون قوة الشد في فولاذ التسليح أقل من قوة الضغط في الجناح المضغوط (الشكل 3-11)، ويحصل ذلك عند تحقق المتراجحة التالية:

$$A_s f_y \leq 0.85 f'_c t_f b_f$$



الشكل (3-11)

وفي هذه الحالة يتم حساب الجائز بشكل T كجائز مقطعه مستطيل بعرض b_f ، وتكون علاقات الحساب كما يلي:

$$M_u = \Omega N'_C Z = \Omega\left(0.85 f'_c b_f y\right)\left(d - \frac{y}{2}\right)$$

$$A_s f_y = 0.85 f'_c b_f y \quad \Rightarrow \quad y = \frac{A_s f_y}{b_f 0.85 f'}$$

$$\mu_f = \frac{A_s}{b_f d} \quad \Rightarrow \quad \alpha = \frac{y}{d} = \mu_f \frac{f_Y}{0.85 f'_c}$$

الحالة الثانية، وفيها يمر المحور السليم ضمن الجسد وتكون قوة الشد في فولاذ التسليح أكبر من قوة الضغط في الجناح: $A_s f_y > 0.85 f'_c t_f b_f$ ، ويكون العزم الداخلي المقاوم مؤلفاً من عزمين:

$$M_u = M_{uT} + M_{u1}$$

حيث:

M_{u1} العزم الأقصى الذي تتحمله منطقة الضغط للجسد بعرض b_w.

M_{uT} العزم الأقصى الذي تتحمله الأجنحة.

وتحدد قيم هذه العزوم بالعلاقات التالية:

$$M_{uT} = \Omega\left(0.85 f'_c t_f\right)\left(b_f - b_w\right)\left(d - \frac{t_f}{2}\right)$$

$$M_{u1} = \Omega\left(0.85 f'_c b_w y\right)\left(d - \frac{y}{2}\right)$$

أما ارتفاع منطقة الضغط (y) ، فتحدد من شرط توازن القوى في المقطع كما يلي:

$$A_s f_y = 0.85 f'_c\left[\left(b_f - b_w\right)t_f + b_w y\right] \Rightarrow$$

$$y = \frac{A_s f_y - 0.85 f'_c\left(b_f - b_w\right)t_f}{0.85 f'_c b_w}$$

- تصميم المقطع T :

تُميز حالتان:

الحالة الأولى، يكون فيها معلوم كل من العزم الحدي التصميمي (M_u)، أبعاد المقطع والمقاومات المميزة للبيتون وفولاذ التسليح ، والمطلوب حساب التسليح.

في البداية، يتم البحث عن موقع المحور السليم لتحديد آلية عمله وذلك عن طريق المتراجحة التالية:

$$M_u \le \Omega\left(0.85 f_c' t_f b_f\right)\left(d - \frac{t_f}{2}\right)$$

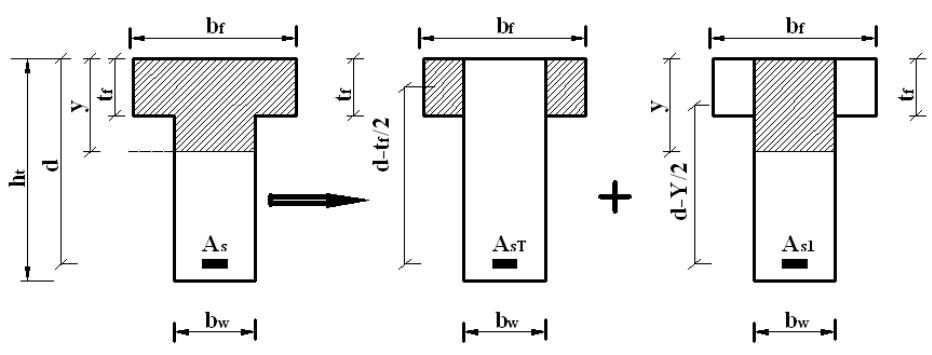
فإذا تحققت المتراجحة السابقة، يكون المحور السليم واقع ضمن الجناح ويحسب المقطع T كمقطع مستطيل عرضه (b_f).

وإذا لم يتحقق ذلك، يكون المحور السليم واقعاً ضمن الجسد (الشكل 3-12)، ويُحسب العزم الذي تتحمله الأجنحة (M_{uT})، بالتالي التسليح (A_{sT}) الموافق من إحدى العلاقتين التاليتين:

$$A_{sT} = \frac{M_{uT}}{\Omega f_y\left(d - \frac{t_f}{2}\right)}$$

$$or$$

$$A_{sT} = \frac{0.85 f_c'\left(b_f - b_w\right)t_f}{f_y}$$



الشكل (3-12)

ويعمل الجسد على مقاومة العزم المتبقي (فرق العزم)، وهو $(M_{u1} = M_u - M_{uT})$، كمقطع مستطيل بعرض (b_w) بتسليح مقداره (A_{s1}). ويكون التسليح الكلي مساوياً: $(A_s = A_{s1} + A_{sT})$.

أما الحالة الثانية، يكون فيها معلوم العزم الحدي التصميمي (M_u) والمقاومات المميزة للبيتون وفولاذ التسليح ، والمطلوب تحديد أبعاد المقطع التسليح. في هذه الحالة تُختار نسبة تسليح (μ_w) قريبة من الدنيا ومحققة لنسبة التسليح المحققة لشرط السهم:

$$\mu_w = 0.18\frac{0.85 f_c'}{f_y}$$

يُتابع الحل بافتراض أن المحور السليم يمر ضمن الجناح، والمقطع مستطيل بعرض (b_f) بنسبة تسليح:

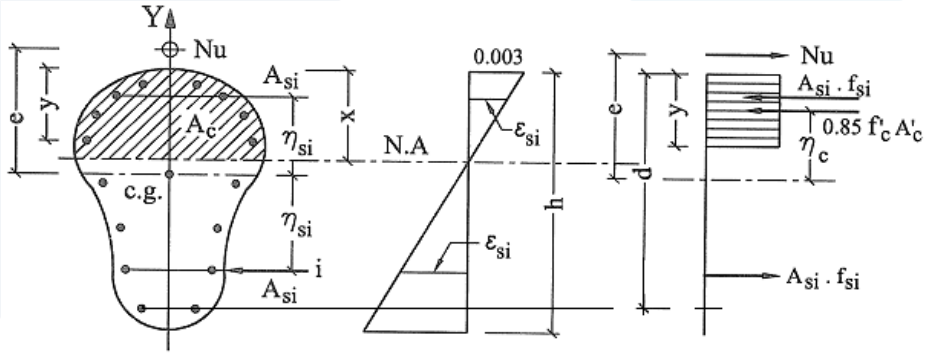
$$\mu_f = \frac{A_s}{b_f\, d} = \frac{A_s}{b_w\, d}\frac{b_w}{b_f} = \mu_w \frac{b_w}{b_f}$$

وعندما يكون $y = \alpha\, d = \mu_f \dfrac{f_y}{0.85\, f'_c} d \le t_f$ ، يتم حساب التسليح كما هو معروف للمقاطع المستطيلة.

وإذا تبين أن $y > t_f$ ، فيحسب المقطع على شكل T ، أو يعمل على زيادة سماكة الجناح أو ارتفاع المقطع ليحسب على أساس مستطيل.

3-5-5- حالة مقطع متناظر مسلح بتسليح متناظر وموزع على محيطه (ضغط لامركزي)

تكتب معادلات توازن القوى الداخلية والخارجية المقاومة للعنصر وفق الشكل (3-13):



الشكل (3-13): الاجهادات والتشوهات والقوى الناظمية في مقطع خاضع لضغط لامركزي

$$N_{ur} = \Omega \left[0.85 \cdot f'_c \cdot A'_c + \Sigma \quad A_{si} \cdot f_{si} \right]$$

$$M_{ur} = N_{ur}.e = \Omega \left[0.85 \cdot f'_c \cdot A'_c \cdot \eta_c + \Sigma \quad f_{si} \cdot A_{si} \cdot \eta_{si} \right]$$

حيث:

N_{ur} قوة الضغط الحديّة القصوى التي يمكن للمقطع تحملها، والمرافقة للعزم M_{ur}.

M_{ur} العزم الحدي الأقصى الذي يمكن للمقطع تحمله، والمرافق للقوة N_{ur}.

e اللامركزية بالنسبة للمحور المار بمركز الثقل العمودي على محور التناظر.

x البعد بين الطرف الأقصى المضغوط والمحور السليم للمقطع البيتوني المسلح.

y الارتفاع الاعتباري للمنطقة المضغوطة $(y = 0.85x)$.

A'_c مساحة المنطقة المضغوطة الاعتبارية من المقطع البيتوني.

A_{si} مساحة صف التسليح (i).

ε_{si} التشوه في صف (i) حسب مخطط التشوه الخطي، ويؤخذ موجباً إذا كان التشوه ضغط، وسالباً إذا كان شد.

f_{si} الإجهاد في صف التسليح (i)، ويساوي إلى: $-f_y \le f_{si} = E_s\,\varepsilon_{si} \le f_y$
ويؤخذ موجباً إذا كان إجهاد ضغط، وسالباً إذا كان إجهاد شد.

η_{si} البعد بين صف التسليح (i) والمحور المار بمركز الثقل والعمودي على محور التناظر، ويؤخذ موجباً إذا كان من نفس طرف القوة N_{ur} بالنسبة لهذا المحور، وسالباً إذا كان من الطرف المعاكس.

η_c البعد بين مركز ثقل المنطقة المضغوطة الاعتبارية والمحور المار بمركز الثقل والعمودي على محور التناظر، وهي موجبة دائماً.

3-5-6- حالة المقطع المستطيل المسلح بتسليح موزع على محيطه (ضغط لامركزي)

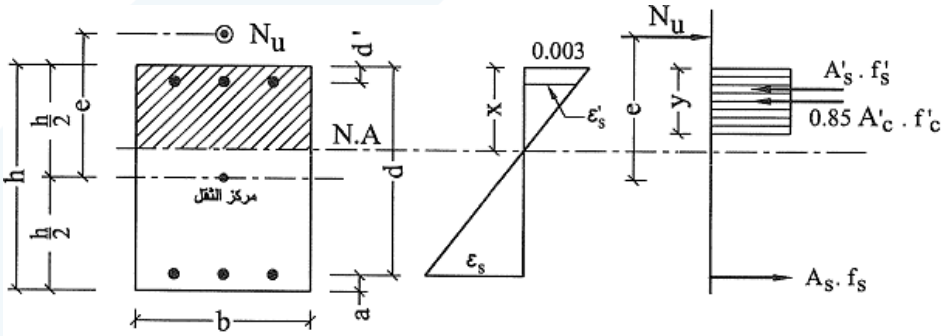
تُستعمل العلاقات المذكورة أعلاه الخاصة بحالة مقطع متناظر مسلح بتسليح متناظر وموزع على محيطه (ضغط لامركزي)، مع استبدال قيم A'_c ، η_c بما يلي:

$$A'_c = b\,y$$
$$\eta_c = 0.5h - 0.5y$$

ويؤخذ المحور المار من مركز الثقل والعمودي على محور التناظر ماراً بمنتصف الارتفاع، وتنسب $(e\ \&\ \eta_{ci})$ إلى هذا المحور.

3-5-7- حالة مقطع مستطيل مسلح بتسليح متوضع على طرفيه (ضغط لامركزي)

تعطى علاقات توازن القوى الداخلية والخارجية المقاومة للعنصر كما يلي (الشكل 3-14):



الشكل (3-14): مقطع مستطيل مسلح بتسليح متوضع على طرفيه (حالة ضغط لامركزي)

$$N_{ur} = \Omega\ \left[0.85\cdot f'_c\cdot b\cdot y + A'_s\cdot f'_s - A_s\cdot f_s\right]$$

$$M_{ur} = N_{ur}.e = \Omega\ \begin{bmatrix} 0.85\cdot f'_c\cdot b\cdot y(0.5h-0.5y) + \\ A'_s\cdot f'_c(0.5h-d') - A_s\cdot f_y(0.5h-a) \end{bmatrix}$$

حيث:

b عرض المقطع المستطيل.

h الارتفاع الكلي للمقطع المستطيل.

e اللامركزية بالنسبة للمحور المار بمركز الثقل العمودي على محور التناظر.

x البعد بين الطرف الأقصى المضغوط والمحور السليم للمقطع البيتوني المسلح.

y الارتفاع الاعتباري للمنطقة المضغوطة $(y=0.85x)$.

A'_s مساحة التسليح الأقرب إلى القوة N_u.

A_s مساحة التسليح الأبعد عن القوة N_u.

d' بعد A'_s عن طرف المقطع الأقرب إلى القوة N_u.

a بعد A_s عن طرف المقطع الأبعد عن القوة N_u.

f'_s الإجهاد في التسليح A'_s

f_s الإجهاد في التسليح A_s

تؤخذ قيم f'_s ، f_s موجبة إذا كانت إجهادات ضغط، وسالبة إذا كانت إجهادات شد، وتعطى من مخطط التشوهات الخطي بالعلاقتين التاليتين:

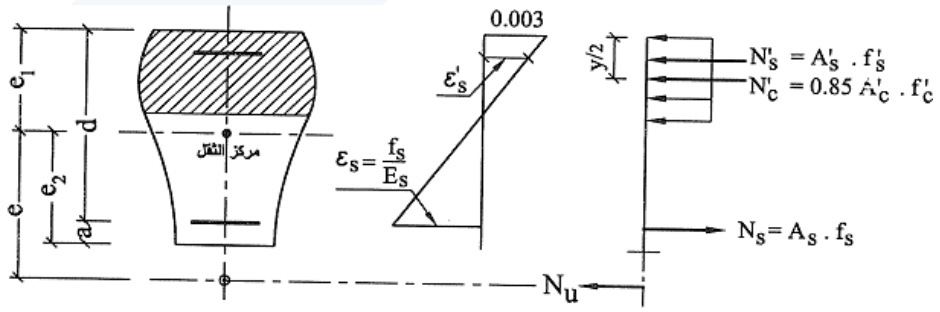
$$-f_y \le f'_s = 630\left(\frac{y-0.85d'}{y}\right) \le f_y$$

$$-f_y \le f_s = 630\left(\frac{-0.85d+y}{y}\right) \le f_y$$

3-5-8- حالة مقطع متناظر مسلح بتسليح متوضع على طرفيه

(شد لامركزي : لامركزية كبيرة)

في مثل هذه الحالة، تقع نقطة تطبيق القوة الشادة خارج المنطقة المحددة بقضبان التسليح المحيطية كما هو مبين في الشكل (3-15):



الشكل (3-15): مقطع مسلح بتسليح متوضع على طرفيه (شد لامركزي : لامركزية كبيرة)

يتعرض المقطع لإجهادات ضغط وشد، كما في حالات الانعطاف البسيط والضغط اللامركزي (اللامركزية كبيرة).

ولدراسة هذه المقاطع، تُميز حالات التحقيق وحالات التصميم:

1. حالات التحقيق:

تكتب علاقات التوازن نسبة الى مركز ثقل المقطع البيتوني المسلح:

$$+N_{ur} = \Omega\ [N_s - N'_c - N']$$
$$+N_{ur}\, e = \Omega[0.85 f'_c A'_c (e_1 - 0.5y) + A'_c\ f'_s (e_1 - d') + A_s\ f_s (e_2 - a)]$$
$$f'_s = 630\left(\frac{y - 0.85d'}{y}\right) \le f_y$$
$$f_s = 630\left(\frac{0.85d - y}{y}\right) \le f_y$$

تكون f'_s في هذه العلاقة موجبة إذا كانت ضغط. وتكون f_s موجبة إذا كانت شد.

2. حالات التصميم:

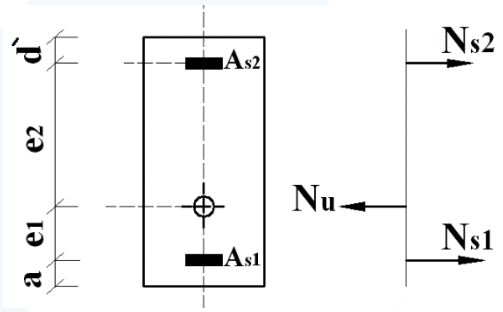
انطلاقاً من أبعاد المقطع، يتم حساب مساحات التسليح. ويمكن أن يحسب المقطع كما لو كان معرضاً لعزم انعطاف بسيط مقداره (M_{us})، على أن يضاف إلى مساحة تسليح الشد الناجمة عن هذا العزم (A_{s1})، القيمة التالية: $A_{s2} = \dfrac{N_u}{\Omega\ f_y}$.

ويكون العزم (M_{us}) هو عزم القوة الناظمية الشادة الحدية (N_u) المطبقة على المقطع نسبة لمركز ثقل تسليح الشد:

$$M_{us} = N_u (e - e_2 + a)$$

3-5-9- المقاطع في حالة الشد اللامركزي (اللامركزية الصغيرة)

تصادف هذه الحالة عندما تقع قوة الشد داخل المقطع، بين مركزي ثقل التسليحين اللذين يكونان في حالة شد كليهما، ويكون المقطع البيتوني متشققاً بأكمله (الشكل 7-16).



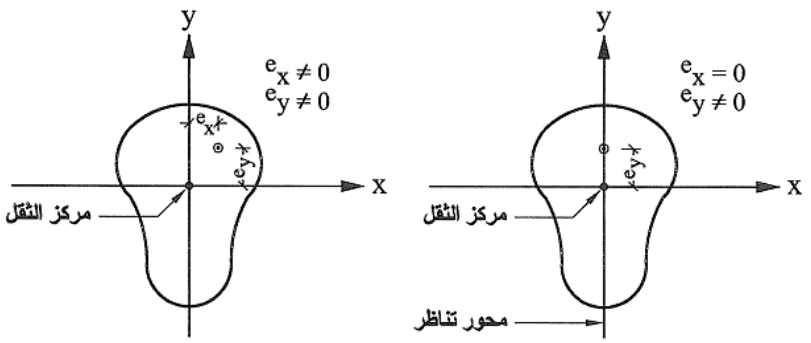
الشكل (3-16): مقطع مسلح بتسليح متوضع على طرفيه (شد لامركزي : لامركزية صغيرة)

تحسب (A_{s1}) و (A_{s2}) مباشرة بأخذ العزم على التوالي، مرة حول مركز (A_{s2}) وأخرى حول مركز (A_{s1}).

<u>وهنا يجب التحقق من شرط التشقق.</u>

3-5-10- حالة اللامركزية المركبة:

في حالة تعرض المقطع إلى لا مركزية مركبة ذات مركبتين e_x ، e_y يمكن اعتماد المبدأ المبسط التالي (الشكل 3-17):



الشكل (3-17): مقطع بلا مركزية مركبة

لا يجوز أن تزيد القوة الناظمية الحدية المطبقة على المقطع N_u على القيمة $N'_{u\max}$ المعطاة بموجب العلاقة التالية:

$$\frac{1}{N'_{u\max}} = \frac{1}{N_{ux\max}} + \frac{1}{N_{uy\max}} - \frac{1}{N_{u\max}}$$

حيث:

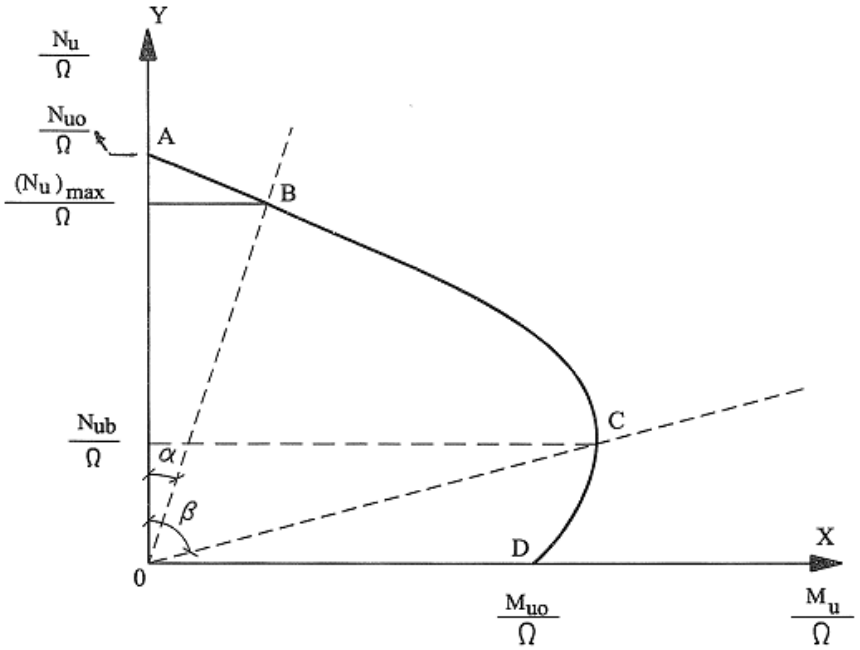
$N_{ux\max}$ القوة الناظمية الحدية القصوى التي يمكن للمقطع تحملها في حالة اللامركزية البسيطة، وبفرض $e_y = 0 \quad , \quad e_x \neq o$.

$N_{uy\max}$ القوة الناظمية الحدية القصوى التي يمكن للمقطع تحملها في حالة اللامركزية البسيطة، وبفرض $e_x = 0 \quad , \quad e_y \neq o$.

$N_{u\max}$ القوة الناظمية الحدية القصوى التي يمكن للمقطع تحملها في حالة الضغط المركزي، بمعنى $e_x = 0 \quad , \quad e_y = o$

3-5-11- مخططات الترابط:

يمكن تمثيل العلاقات الواردة أعلاه لكل مقطع مفروض، بمخطط الترابط المبين في الشكل (3-18):



الشكل (3-18): مخطط الترابط (العلاقة بين القوة الناظمية والعزم)

- يمثل ترتيب النقطة (A) على المحور $(0y)$، المقاومة النظرية لمقطع معرض لضغط محوري ناظمي دون عزم مطبق (N_{u0}/Ω).
- يمثل ترتيب النقطة (B) على المحور $(0y)$، مقاومة الضغط القصوى المسموح بها النظرية للمقطع المعرض لضغط محوري ناظمي، دون عزم، أو مرفق بعزم بسيط (لامركزية طارئة من الصنع) حسب الحالة $(N_{u\max}/\Omega)$ حيث:

$\frac{N_{u\max}}{\Omega} = 0.8\frac{N_{uo}}{\Omega}$ (في حالة المقطع المسلح بتسليح عرضي عادي: اطارات أو أساور...).

$\frac{N_{uma}}{\Omega} = 0.85\frac{N_{uo}}{\Omega}$ (في حالة المقطع المسلح بتسليح عرضي حلزوني).

ويمثل ميل الخط $(0B)$ عن المحور $(0y)$ اللامركزية الدنيا التي يتم تصميم كل مقطع ضمناً على تحملها، حتى لو قلت اللامركزية الفعلية عنها، أي: $e_{\min} = \tan\alpha$.

- تمثل النقطة (B) الوضعية التوازنية، ويكون ترتيبها على المحور $(0y)$، قيمة القوة الضاغطة الحدية في الوضع التوازني (N_{ub}/Ω). ويمثل ميل الخط $(0C)$ عن المحور $(0y)$ اللامركزية التوازنية، أي: $e_b = \tan\beta$.

فإذا كانت $e < e_b$ يتم الوصول إلى الحالة الحدية بانكسار البيتون في الضغط، في حين يكون الاجهاد في التسليح الأبعد عن القوة (N_u)، إما إجهاد ضغط أو إجهاد شد تقل قيمته المطلقة عن حد الخضوع (f_y). أما الاجهاد

في التسليح الأقرب من القوة (N_u)، فتصل قيمته إلى حد الخضوع (f_y). وتدعى اللامركزية في هذه الحالة باللامركزية الصغيرة.

وإذا كانت $e > e_b$ فتتحقق الحالة الحدية بعد وصول إجهاد الشد في التسليح الأبعد عن القوة (N_u) إلى حدّ الخضوع (f_y). وتدعى اللامركزية في هذه الحالة باللامركزية الكبيرة.

- تمثل فاصلة النقطة (f_y) على المحور $(0x)$، العزم الحدي الأقصى (M_{uo}/Ω) الذي يمكن للمقطع تحمله دون وجود قوة ضغط مرافقة (الانعطاف البسيط).
- يكون المقطع محققاً لشروط الأمان في حالة الحد الأقصى، إذا كانت النقطة التي تمثل قيم $\left(\frac{N_u}{\Omega}, \frac{M_u}{\Omega}\right)$ المطبقتين واقعة على مخطط الترابط أو ضمنه، ويكون غير محقق لشرط الأمان إذا وقعت النقطة خارجه.

12-5-3- المقاطع البيتونية المعرضة لقوى قص حدية (V_u) وفتل حدي (T_u):

- **مقاومة البيتون للقص (τ_{cu}) الناجم عن الجهد القاطع الحدي (V_u)**

- حالة العناصر المعرضة لانعطاف (M_u) وقص (V_u) حديين معاً، وغير معرضة لفتل أو قوة ناظمية، سواءً كانت في العناصر الخطية أو البلاطات التي يزيد سمكها عن $20cm$ (ماعدا ما سيرد في الفقرة اللاحقة):

$$\tau_{cu}(MPa) = 0.23\sqrt{f'_c}(MPa)$$

- في البلاطات المصمتة والأساسات بجوار الحمولة أو رد الفعل المركز:

$$\tau_{cu}(MPa) = \left(0.16 + \frac{a}{3b}\right)\sqrt{f'_c} \le 0.31\sqrt{f'_c}(MPa)$$

حيث: a طول الضلع الأقصر لمساحة الحمولة أو رد الفعل المركز.

b طول الضلع الأطول لمساحة الحمولة أو رد الفعل المركز.

- عند ترافق القص الحدي (V_u) مع قوة ضغط حدية مقدارها N'_u:

$$\tau_{cu}(MPa) = \left(1 + 0.07\frac{N'_u}{A'_c}\right) \times 0.16\sqrt{f'_c}(MPa)$$

حيث: A'_c مساحة المقطع البيتوني الإجمالية.

- عند ترافق القص الحدي (V_u) مع قوة شد ناظمية حدية مقدارها N_u:

$$\tau_{cu}(MPa) = \left(1 - 0.3\frac{N_u}{A_c}\right) \times 0.16\sqrt{f'_c}(MPa) \ge 0$$

حيث: A_c مساحة المقطع البيتوني الإجمالية.

- عند تحقق المتراجحة: $\tau_{cu} \ge \tau_u$، البيتون يقاوم القص الحدي، ولا يحسب التسليح العرضاني، بل يكتفى بتسليح أصغري مقداره:

$$A_{st\min} = \frac{0.35}{f_y} b s$$

حيث: $s(mm)$ التباعد بين الأساور.

$b(mm)$ عرض الجائز.

$f_y(MPa)$ المقاومة المميزة للتسليح العرضاني.

- أما عندما يكون $\tau_{cu} < \tau_u$ ، فتؤخذ مساهمة البيتون (الحصة الافتراضية) في مقاومة القص بقيمتها العظمى τ_{ou} ، والتي تحدد كما يلي:
  - $\tau_{ou} = 0$ ، اذا كان المقطع المدروس يتقاطع أو ينطبق مع فاصل صب، وعندما يكون جزء من تسليح الشد الطولي الرئيس الموجب منتهياً ضمن المجاز وفي منطقة الشد.
  - $\tau_{ou} = 0.35\tau_{cu}$ ، في حال غياب أحد الشرطين السابقين.
  - $\tau_{ou} = 0.7\tau_{cu}$ في حال غياب الشرطين السابقين، وهي الحالة المثالية في التصميم والتنفيذ.
- في حال تعرض العنصر إلى قوى شد حدية تتسبب في وقوع المحور السليم خارج المقطع، يحسب التسليح لمقاومة القص الحدي المحسوب τ_u ، وتهمل مساهمة البيتون للقص.
- أما عندما يترافق القص الحدي (V_u) مع عزم فتل حدي (T_u) ، ينتج عنه إجهاد قص تزيد قيمته عن $\tau_{tu} > 0.13\sqrt{f'_c}(MPa)$ ، يسمح للبيتون مقاومة إجهادات قص افتراضية تساوي:
  - في الحالة المثالية للتصميم والتنفيذ:

$$\tau_{ou} = \tau_{cu} = \frac{0.16\sqrt{f'_c}}{\sqrt{1+\left(\frac{\tau_{tu}}{1.2\tau_u}\right)^2}}(MPa)$$

حيث: $\tau_u(MPa)$ إجهاد القص الحدي الناجم عن القص.

$\tau_{tu}(MPa)$ إجهاد القص الحدي الناجم عن الفتل.

  - $\tau_{ou} = 0$ ، اذا كان المقطع المدروس يتقاطع أو ينطبق مع فاصل صب، وعندما يكون جزء من تسليح الشد الطولي الرئيس الموجب منتهياً ضمن المجاز وفي منطقة الشد.
  - و في حال غياب أحد الشرطين السابقين:

$$\tau_{ou} = \tau_{cu} = \frac{0.08\sqrt{f'_c}}{\sqrt{1+\left(\frac{\tau_{tu}}{1.2\tau_u}\right)^2}}(MPa)$$

- **الاجهاد المماسي المسموح مقاومته بالبيتون (τ_{tcu}) الناتجة عن الفتل الحدي (T_u)**
  - $\tau_{tcu} = 0.13\sqrt{f'_c}$ ، المقطع معرض لفتل صاف.
  - $\tau_{tcu} = 0$ ، في حال وجود قوة شد هامة على المقطع، بالإضافة إلى الفتل، يصمم المقطع بحيث يقاوم التسليح كامل الاجهادات المماسية المحسوبة (τ_{tu}).

في حال وجود القص والفتل معاً، تحسب مساحة التسليح العرضي لمقاومة الاجهادات المماسية الناتجة عن القص والفتل، كل على حده.