

كلية هندسة العمارة – جامعة المنارة

إعداد

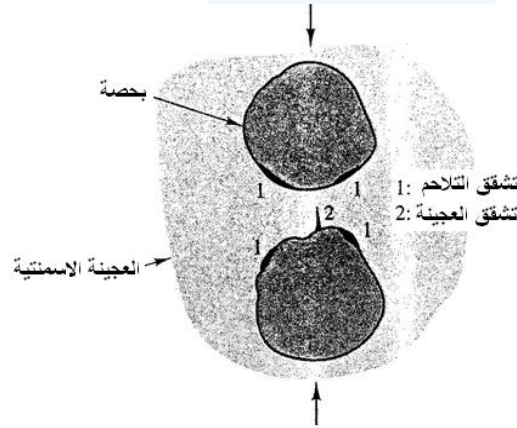
أ.د. بسام حويجة

2- السلوك الميكانيكي للبيتون ولفلواذ التسليح

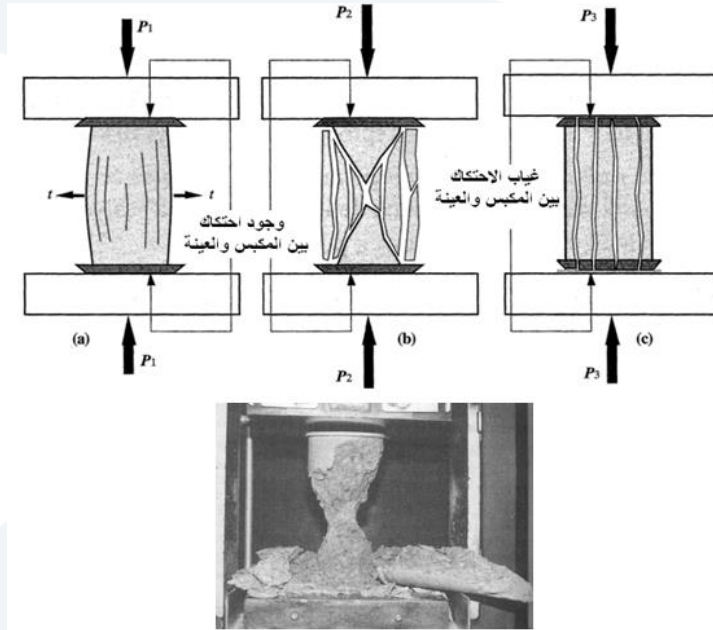
1-2- سلوك البيتون المضغوط (البيتون المتصلب):

تؤكد الملاحظات التي تعطيها الدراسات المجهرية لعينة بيتونية مجربة على الضغط البسيط أن انهيار المادة يبدأ بتشكيل شبكة من الشقوق الواقعة على السطح المشترك بين العجينة الإسمنتية والحصى وكذلك جملة التشققات الموجودة في المونة (الشكل 1-2)، لتتصل مع بعضها البعض مشكلة شقوق صريحة، مسببة انهيار المادة. وفي حالة اختبار عينة من البيتون على الضغط البسيط، تأخذ هذه الشقوق الصريحة التي تسبب انهيار العينة، أحد النمطين التاليين (الشكل 2-2):

- شقوق موازية لإجهادات الضغط المطبقة: إلغاء كامل للاحتكاك بين مكبس جهاز الكسر والعينة.
- شقوق مائلة "تشكل مخروط"، نتيجة وجود احتكاك بين المكبس والعينة.

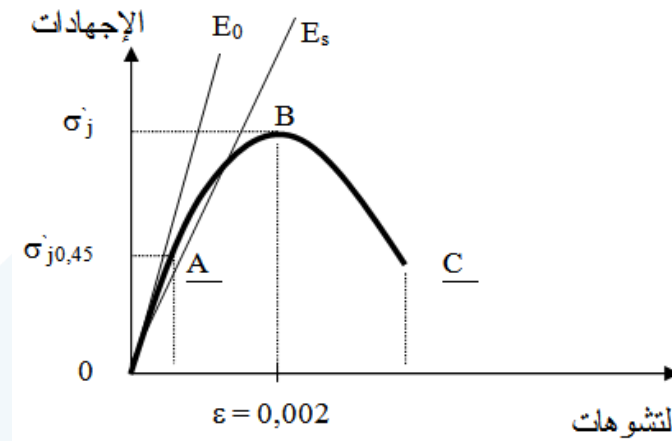


الشكل (1-2): تشققات في العجينة الإسمنتية وفي السطح المشترك مع الحصى (تلاحم)



الشكل (2-2): أنماط انهيار عينة بيتونية على الضغط البسيط

بالتالي فإن السبب الأساسي لانهيار المادة البيتونية يكمن بتطور التشققات المجهرية والفراغات الملازمة للمادة، من لحظة تصنيعها (فراغات ناجمة عن تبخر الماء، انكماش، تقلص.....)، وفق مستويات التحميل المختلفة. ويعلل هذا التطور المستقر للتشققات المظهر اللاخطي للمنحني التجريبي الذي يربط الإجهادات بالتشوهات، كما هو مبين بالشكل (2-3).



الشكل (3-2): المنحني إجهادات - تشوهات لبيتون معرض للضغط البسيط

نلاحظ بأن المنحني $(\sigma - \epsilon)$ يحوي قسماً خطياً OA حتى حوالي 45% من مقاومة المادة على الضغط (σ'_j) ، ويعبر هذا الجزء عن الحالة شبه السليمة للمادة (تشققات مجهرية متماثلة وغير نشيطة) (مرونة خطية). بعد النقطة A، يبدأ المنحني بالتقوس حيث تنتشر التشققات السطحية المجهرية وتزداد درجة تضرر المادة كلما زادت الحمولة لتصل إلى 80% تقريباً من المقاومة (σ'_j) حيث تنتشر الشقوق بسرعة في العجينة الإسمنتية وفي السطح المشترك بينها وبين الحصويات وكذلك عبر الحصويات الضعيفة لتصل إلى مرحلة الانهيار (BC).

إذن يمكن وصف سلوك البيتون المعرض لحمولة ما بواسطة عامل (D)، يسمى عامل التضرر، وله معنى فيزيائي يتمثل بانخفاض المقطع أو الحجم المقاوم بسبب التشققات أو الفراغات المجهرية. يقيس هذا العامل درجة التخریب المستور لمادة ما، ويترجم بواسطة متغيرات داخلية مخفية. ويمكننا وصف سلوك المادة البيتونية بالعلاقة التالية:

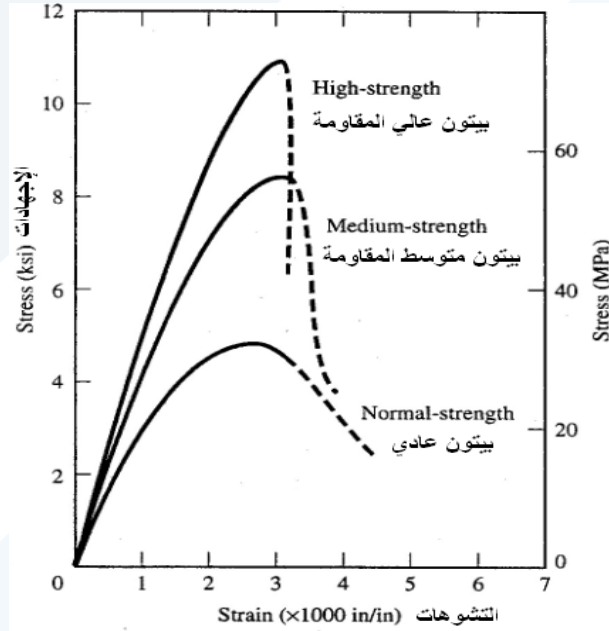
$$\sigma = E_s \varepsilon = E_0 (1 - D) \varepsilon$$

حيث: E_s : عامل المرونة المتضررة (عامل التشوه الطولاني القاطع)
 E_0 : عامل مرونة البيتون الأولي (المماس للمنحني في نقطة المبدأ O).

وتتراوح قيمة عامل التضرر بين الصفر والواحد: $0 \leq D \leq 1$

$D = 0$: لا يوجد تضرر (المادة سليمة)، و $D = 1$: انهيار المادة.

ويوضح الشكل (4-2) السلوك الميكانيكي لعدة أنواع من البيتون المعرض للضغط البسيط، وذلك من خلال تبيان العلاقة التي تربط الاجهادات بالتشوهات.



الشكل (4-2): العلاقة ($\sigma - \varepsilon$) لعدة أنواع من البيتون المعرض للضغط البسيط

تحدد المقاومة المميزة للبيتون على الضغط ($f'_c = f'_{c28}$)، أو على الشد ($f'_t = f'_{t28}$) من نتائج اختبارات عينات اسطوانية نظامية عمرها 28 يوماً، محفوظة في الماء بدرجة حرارة 20 ± 2 درجة مئوية.

ويقوم المهندس الدارس باختبار جودة أو نوعية البيتون، التي تمثل المقاومة الاسطوانية المميزة لها على الضغط (f'_c) بما يتناسب مع طبيعة المنشأة المدروسة.

عندما لا يكون هناك عدد كاف من العينات البيتونية اللازمة لإجراء تحليل إحصائي نحسب من خلاله المقاومة المميزة للبيتون، يمكننا اعتماد العلاقة التالية في تحديد هذه المقاومة كتابع للمقاومة المتوسطة للعينات المجربة (f'_{cm}):

$$f'_c = \frac{f'_{cm}}{1.15}$$

وعند إجراء الحسابات في مراحل التنفيذ أو الاستثمار، يمكن للمهندس الاعتماد على مقاومة البيتون على الضغط عند عمر مساوي لـ (j) يوم (f'_{cj}) ، بحيث يتم تحديدها كتابع للمقاومة الاسطوانية المميزة (f'_{c28}) ، وفقاً للعلاقة التالية، وذلك لببتون مقاومة أقل من $(f'_{c28} < 40MPa)$.

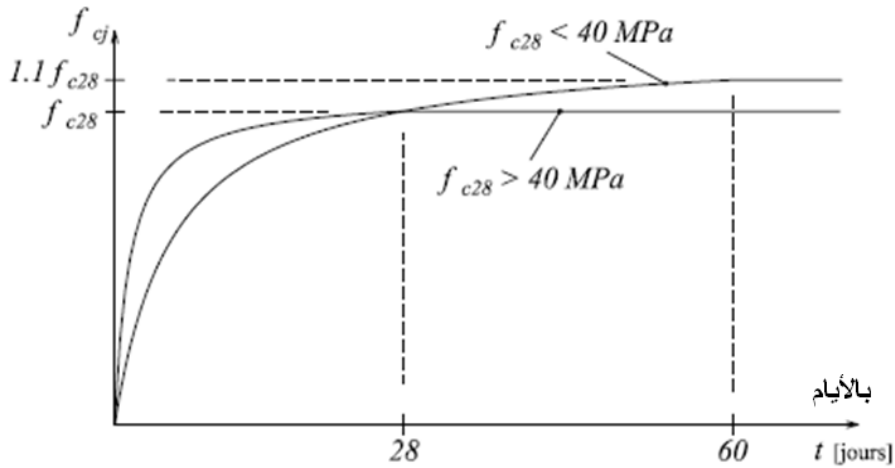
- من أجل عمر أقل من 60 يوم:

$$f'_{cj} = \frac{j}{4.76 + 0.83j} f'_{c28}$$

- من أجل عمر أكبر من 60 يوم:

$$f'_{cj} = 1.1 f'_{c28}$$

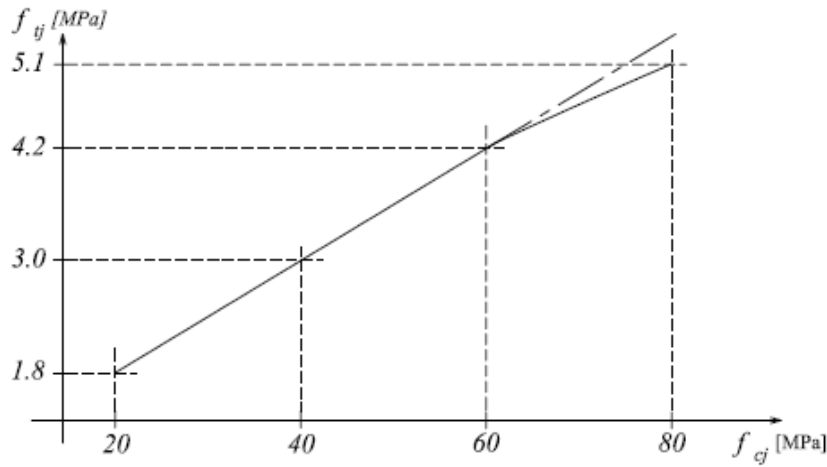
ويوضح الشكل (5-2) تطور هذه المقاومة مع الزمن، مقاساً بالأيام، وذلك لنوعين من الببتون $(f'_{c28} < 40MPa \text{ \& } f'_{c28} > 40MPa)$.



الشكل (5-2): تطور مقاومة الببتون على الضغط البسيط مع الزمن

وفيما يخص مقاومة الببتون على الشد عند عمر (j) يوم (f_{tj}) ، يمكن أن تحدد استناداً للمقاومة على الضغط، وفق العلاقة التجريبية التالية، وكما هو موضح في الشكل (6-2).

$$f_{tj} = 0.6 + 0.06 f'_{cj} (MPa) ; (f'_{c28} < 60MPa)$$



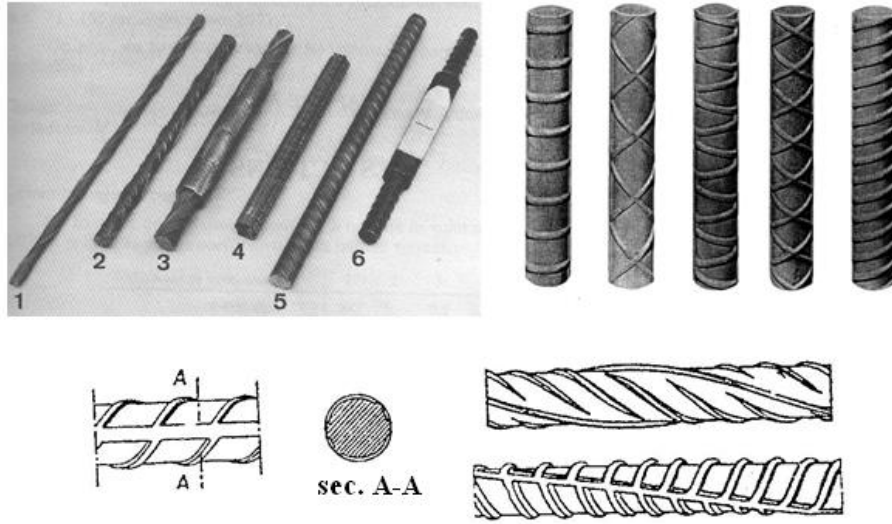
الشكل (6-2): تطور مقاومة البيتون على الشد تبعاً لمقاومته على الضغط البسيط

2-2- سلوك فولاذ التسليح:

عند تنفيذ المنشآت الأولى من البيتون المسلح استعمل الحديد كمادة تسليح، وما لبثت هذه المادة أن استبدلت بالفولاذ ذي الخواص الميكانيكية العالية. أما الآن فيعتبر الفولاذ المادة الوحيدة المستخدمة في صنع قضبان التسليح، حيث سعر كلفته أخفض من سعر الكلفة لأي من المنتجات الصناعية الأخرى التي تتمتع بالمقاومة الميكانيكية نفسها. كما قبل المصممون بعيوب الفولاذ الرئيسية وبصورة خاصة صموده الرديء أمام أوكسجين الهواء الذي يسبب انكساره عن طريق إصابته بالصدأ.

إضافة إلى ذلك يعتبر الفولاذ المستعمل في البيتون المسلح أرخص ثمناً من أي فولاذ آخر متوفر في الصناعة، لذلك لا يطلب منه تحقيق قابلية خاصة للحام ولا مقاومة ضد الصدأ، على اعتبار أن البيتون الذي يغلفه يقدم له وقاية خاصة، كما لا يطلب منه تأمين خواص ميكانيكية عالية مما يزيد كثيراً من سعر كلفته.

حتى حوالي عام 1950 م، كان الفولاذ المستعمل في البيتون المسلح من النوع العادي، وقد تم إنتاجه على شكل قضبان مستديرة، ولكن اعتباراً من تلك الفترة طرأ تطور مهم على صناعته، إثر تحسين نوعية الفولاذ المصنوع، وعلى الأخص في سطوحه الخارجية التي لم تعد ملساء ولكنها مجهزة بنتوءات من شأنها تحسين التلاحم مع البيتون (الشكل 2-7). ويزيد سعر هذه القضبان - كبيرة التلاحم - قليلاً عن سعر القضبان الملساء، وقد حلت محلها شيئاً فشيئاً حيث اقتصر استعمال القضبان الملساء حالياً على عدد من الحالات الخاصة.



الشكل (7-2): أنواع مختلفة من قضبان التسليح الفولاذية المستخدمة في أعمال البيتون المسلح

منحني شد الفولاذ:

يتوجب معرفة الخواص الميكانيكية للفولاذ المستخدم في المنشآت البيتونية المسلحة بشكل دقيق حتى نأخذ بالحسبان مقاومة هذه المنشآت دون خطر الانهيار للتضررات الملازمة التي ستحصل مع مرور الزمن. يبين الشكل (8-2) المنحني المسجل أثناء إجراء تجربة الشد لعينة نظامية لأحد أنواع الفولاذ والذي يربط الاجهادات بالتشوهات.

عندما يتم إخضاع العينة الفولاذية ذات الطول الأولي (L) ، عادة خمسة أمثال قطرها، لجهد شد فإنها تتناول ويصبح طولها (L+ΔL) ، وتسمية:

F: قوة الشد ، S: المقطع العرضي للعينة

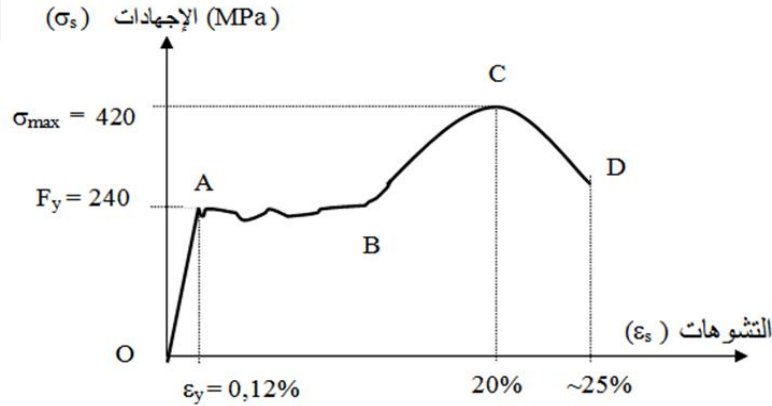
يكون: $\epsilon_s = \frac{\Delta L}{L}$: التشوه أو التناول النسبي، و $\sigma_s = \frac{F}{S} = f(\epsilon_s)$: الاجهادات.

يلاحظ بأن الجزء OA على شكل مستقيم حيث تتناسب الاجهادات مع التشوهات وتكون المادة خاضعة لقانون هوك الخطي ($\sigma = E_s \cdot \epsilon_s$) ، أي أن المادة تسلك سلوكاً مرناً، وإذا حذفنا قوة الشد المطبقة في أية نقطة من هذا المجال تستعيد العينة طولها الأصلي.

اعتماداً على هذا المجال المرن يتم تحديد عامل المرونة الطولاني للمادة (عامل يونغ):

$$E_s = \frac{f_y}{\epsilon_y} = \frac{240}{0,12} \times 100 = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$$

حيث: f_y : حد المرونة (إجهاد الخضوع). و ϵ_y : التشوه المرن المقابل لهذا الحد.

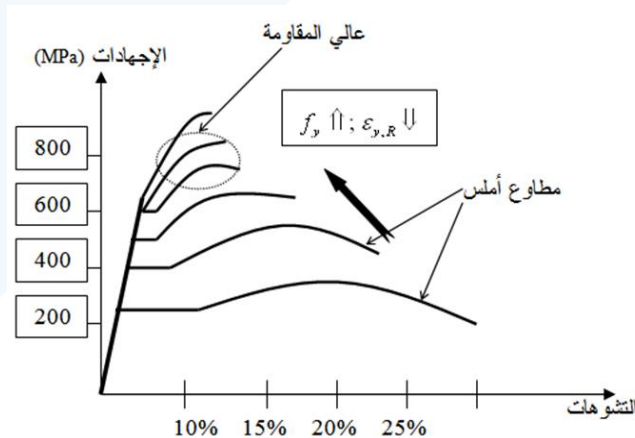


الشكل (8-2): اختبار الشد لفولاذ مطاوع أملس

تدل التجارب على أن قيمة عامل مرونة الفولاذ ثابتة تقريباً مهما كان نوع الفولاذ المستخدم. ويعتمد الكود السوري القيمة التالية لهذا العامل: $E_s = 2,1 \times 10^5 \text{ MPa}$.

وإن قيمة إجهاد الخضوع f_y ، تتغير تبعاً لنوع الفولاذ المجرب. إذا تابعنا زيادة القوة إلى ما بعد القيمة الموافقة للنقطة (A) ، نلاحظ أنه بعد حذف الجهد المطبق لا تعود المخبرة إلى طولها الأصلي بسبب بقاء التباطؤ. وبالتالي نكون واقعين في منطقة التغير الدائم، ثم نبقى كذلك حتى النقطة (C) التي تمثل الإجهاد الأعظمي الذي يستطيع المعدن مقاومته (إجهاد الانكسار). أما ما بعد النقطة (C) فتستمر العينة بالتباطؤ حتى تأثير إجهادات متناقصة وبذلك تصل بسرعة إلى مرحلة الانقطاع.

ويظهر الشكل (9-2)، أنه كلما ازدادت مقاومة فولاذ التسليح (إجهاد الخضوع)، كلما قل طول عتبة اللدونة AB والعكس صحيح. هذا الواقع تم إثباته تجريبياً وهو إحدى خواص فولاذ التسليح. إذا أخضعنا العينة إلى جهد ضغط بدلاً عن الشد، تبقى الظاهرة نفسها تماماً، في مرحلة المرونة على الأقل حيث تتعقد الظاهرة بعد ذلك بسبب التحنيب. وتبقى القيم التي حصلنا عليها من أجل عامل المرونة وحد المرونة نفسها في الضغط والشد.



الشكل (9-2): سلوك فولاذ التسليح المطاوع وعالي المقاومة

3-2- المقامات المميزة وفق الكود السوري- درجة الجودة

أ- البيتون:

تحدد المقاومة المميزة للبيتون على الضغط أو على الشد من نتائج اختبارات عينات نظامية عمرها 28 يوماً، محفوظة في الماء بدرجة حرارة $(20 \pm 2C^\circ)$.

يقوم المهندس الدارس باختبار جودة أو نوعية البيتون، التي تمثل المقاومة الاسطوانية المميزة لها على الضغط (f'_c) بما يتناسب مع طبيعة المنشأة المراد تنفيذها. وعندما لا تكون العينات المختبرة على الضغط اسطوانية قياسية (قطر 15 سم بارتفاع 30 سم)، يمكننا اعتماد معامل التصحيح الوارد في الجدول (1-2) للأشكال المختلفة لعينات الاختبار:

معامل التصحيح	أبعاد عينة الاختبار بالمليمتر بفرض أنها ذات أسطح مستوية ومتوازية	شكل العينة
1.00	150 × 300	الاسطوانة
0.97	100 × 200	
1.05	250 × 500	
1.00	150 × 150 × 300	الموشور
1.05	150 × 150 × 450	
1.05	200 × 200 × 600	
0.78	100 × 100 × 100	المكعب
0.80	150 × 150 × 150	
0.83	200 × 200 × 200	
0.90	300 × 300 × 300	

الجدول (1-2): معامل تصحيح المقاومة

يجب التمييز بين حالتين للبيتون عند تحديد المقامات الميكانيكية المميزة: حالة البيتون المراقب وحالة البيتون غير المراقب. ويكون البيتون مراقب عند تحقيق الشروط التالية:

- تقسيم الحصويات إلى عدة حجوم: بحص خشن، بحص ناعم، رمل خشن، رمل ناعم ...
- استعمال العيارات الوزنية بما يحقق تدرج حي ضمن المنحنيات النظامية المعتمدة.
- الأخذ بالاعتبار رطوبة الحصويات قبل تصنيع الخلطة.
- الإشراف الدائم على عملية التصنيع وأخذ عينات نظامية لضبط الجودة.

نبين في الجدول (2-2) التصنيف المعتمد من قبل الكود السوري لدرجات جودة البيتون واستعماله:

C 12	C 10	C 8	C 5	درجة الجودة	
12	10	8	5	Mpa	المقاومة المميزة بالضغط f'_c
120	100	80	50	kgf/cm ²	
خرسانة عادية (أساسات - جدران الخ)		نظافة تحت الاساسات	خرسانة ردمية	مجال الاستعمال	

C45	C40	C 35	C 30	C 25	C 20	C 18	C15	درجة الجودة	
45	40	35	30	25	20	18	15	MPa	المقاومة المميزة بالضغط f'_c
450	400	350	300	250	200	180	150	kgf/cm ²	
خرسانة مسلحة وخرسانة مسبقة الإجهاد				خرسانة مسلحة			مجال الاستعمال		

الجدول (2-2): درجة جودة البيتون

وعند تحقيق الشروط العائدة للبيتون المراقب (نوعي)، يمكننا اعتماد القيم الواردة في الجدول (3-2):

450*		400		350	300	كمية الأسمنت kg/m^3	
C45	C40	C35	C30	C25	C20	C18	درجة جودة الاسطوانة
45	40	35	30	25	20	18	المقاومة الاسطوانية
450	400	350	300	250	200	180	المميزة المحتملة f'_c
							MPa
							kgf/cm ²

* مع ضرورة إضافة ملدنات عالية الجودة super plasticizer وسيليكا فيوم silica fume. ويمكن استعمال مقاومات أعلى لأغراض إنشائية خاصة وبشرط إجراء اختبارات خاصة وأن يتم تدقيقها من جهة متخصصة والتأكد من ضمان استمرارية المحافظة على الجودة أثناء التنفيذ.

الجدول (3-2): مقاومات الضغط للبيتون المراقب

وعندما لا يتم تحقيق الشروط السابقة أي حالة البيتون غير المراقب بشكل دقيق، فيمكن اعتماد مقاومات الضغط المبينة في الجدول (4-2):

450*		400	350	300	250	200	150	100	كمية الأسمنت kg/m^3	
C25	C20	C18	C15	C12	C10	C8	C5	درجة جودة الخرسانة		
25	20	18	15	12	10	8	5	MPa	المقاومة	
250	200	180	150	120	100	80	50	kgf/cm ²	الاسطوانية المميزة المحتملة f'_c	
خرسانة مسلحة				خرسانة عادية		نظافة تحت الأساسات		ردم	مجال الاستعمال	

* مع ضرورة إضافة ملدنات عالية الجودة super plasticizer وسيليكا فيوم silica fume.

الجدول (4-2): مقاومات الضغط للبيتون غير المراقب

ب- فولاذ التسليح:

يبين الجدول (5-2) الخواص الميكانيكية لأنواع الفولاذ الأكثر استعمالاً (الكود السوري).

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

الجدول (5-2): الخواص الميكانيكية لأنواع الفولاذ (كود سوري)

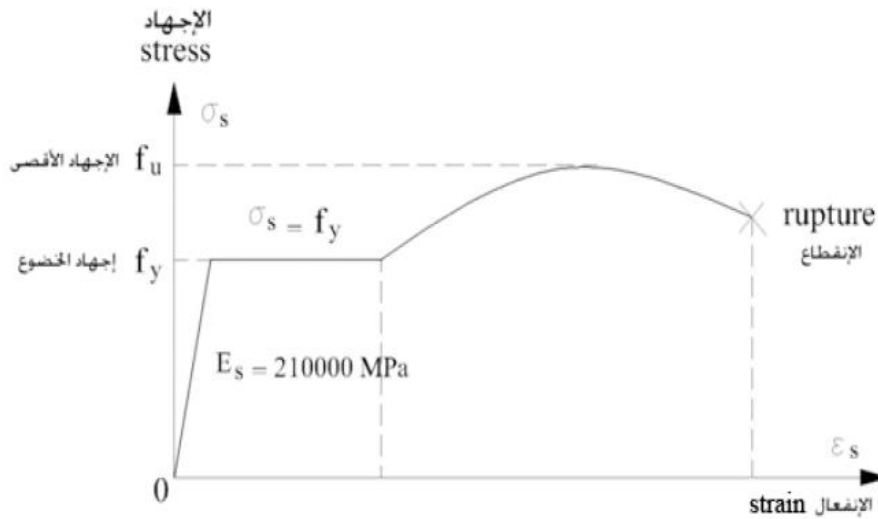
ملاحظة هامة:

يلزم الكود السوري تخفيض القيم المميزة الاسمية لـ f_y في الحسابات المرتبطة بعملية التصميم، وذلك عندما تكون قيم f'_c المعتمدة قليلة نسبياً، ويمكننا اعتماد القيم المخفضة كما هو وارد في الجدول (6-2). أما عندما تكون المسألة هي عملية تحقيق للمنشآت والأبنية القائمة فتستعمل قيم المقاومة المميزة الاسمية للفلود f_y المستعمل دون تخفيض.

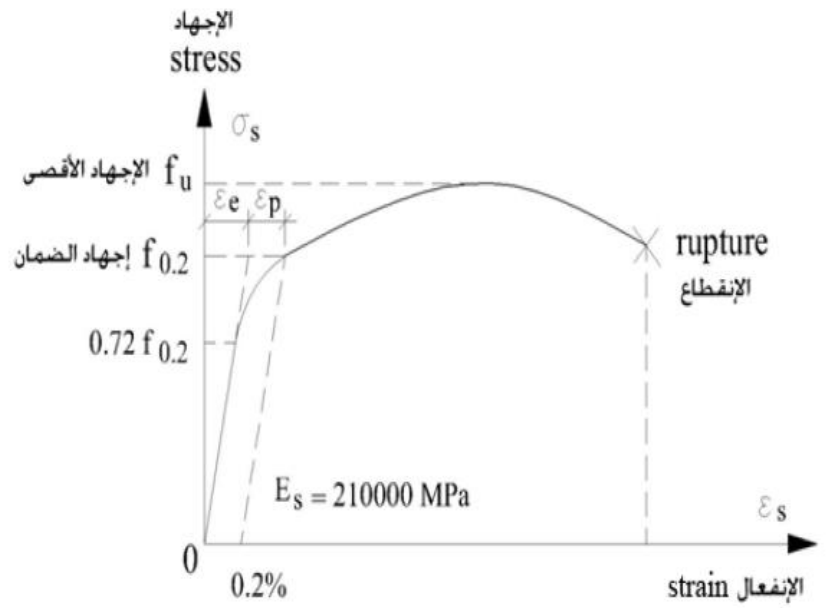
f'_c (MPa) \ f_y (MPa)	≤ 15	16.5	≥ 18
240	240	240	240
280	240	250	280
300	250	260	300
360		300	360
400			400

الجدول (6-2): تخفيض القيم المميزة الاسمية لـ f_y

وتبين الأشكال التالية 2- (10 و 11)، المنحنيات الافتراضية اجهاد - تشوه لأنواع الفلود المستخدم في سوريا (كود سوري).



الشكل (10-2): المنحني الافتراضي اجهاد - تشوه (انفعال) للفلود الطري العادي والعالي المقاومة



الشكل (2-11): المنحني الافتراضي اجهاد - تشوه (انفعال) للفلوآذ المعالج على البارد