يكتسب البيتون 16% تقريبياً من مقاومته العظمى بعد مرور يومٍ واحدٍ، و40% من مقاومته في غضون 3 أيام، 65% من مقاومته في 7 أيام، 90% خلال 14 يومًا و99% من مقاومته الأعظمية تقريبياً بعد مرور 28 يومًا من الصب.

الجدول (1): نسبة اكتساب المقاومة مع الزمن تقريبياً

العمر بعد الصب	نسبة المقاومة المكتسبة تقريبياً %
يوم واحد	% 16
3 أيام	% 40
7 أيام	% 65
14يوم	% 90
28 يوم	% 99

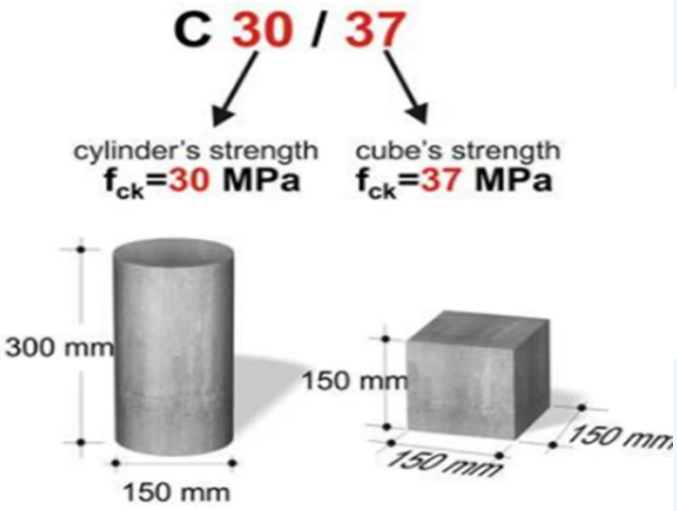
.

أي أن الخرسانة تكتسب معظم مقاومتها خلال أسبوعين بعد الصب، (90% من مقاومتها في 14 يومًا).

وبعد 4 أسابيع (28 يوم) تزداد المقاومة زيادة طفيفة وبسرعة أقل بكثير مقارنةً مع الفترة الممتدّة قبل 28 يوماً. حيث أن مقاومة الخرسانة البالغة 99% قريبة بشكل كبير من مقاومته النهائية المتمثّلة بعد سنة أو سنتين من الصبّ. لذلك يعتمد المهندسون على قيمة المقاومة الناتجة عن الاختبار على الضغط والتي تجري بعد 28 يومًا من الصب. ويستخدمون هذه النتيجة في الحسابات. فالانتظار لإجراء الاختبار سنةً كاملةً غير مجدٍ عمليًا.

تجرى تجارب تحديد المقاومة للخرسانة على عينات خرسانية بأشكال وأبعاد قياسية حسب الكود المُعتمد في كل دولة:

- عينات مكعبية نظامية بأبعاد cm(15×15×15) كما في إنجلترا، وألمانيا، والهند، ومصر.
- عينات أسطوانية نظامية بقطر 15cm وارتفاع 30 cm كما دول أمريكا الشمالية.
- في سوريا يمكن استخدام العينات الاسطوانية وكذلك المكعبية مع الانتباه إلى أن مقاومة العينات المكعبية أكبر من مقاومة العينات الاسطوانية وللحصول على مقاومة العينات الاسطوانية النظامية من المقاومة المكعبية النظامية نضرب بعامل تصحيح 0.8 تقريباً وبحسب الجداول المعتمدة بالكود الهندسي.



في بعض الأحيان تُجرى تجارب تحديد المقاومة قبل مضي 28 يومًا على الصب، أو على عينات بأبعاد أو أشكال مغايرة للعينات القياسية النظامية، ولذلك فالكودات التي تحدد مواصفات الخرسانة تعتمد طرقاً مختلفة لتعديل النتائج المخبرية لتتوافق مع النتائج فيما لو أجريت التجربة بعد 28 يومًا على عينات قياسية نظامية.

سنعرض خطوات إجراء التجربة قبل التطرق لعوامل التصحيح.

خطوات اختبار مقاومة الخرسانة على الضغط مخبريًا:

- تجميع أجزاء القالب (مكعب أو أسطوانة أو موشور) وربطها بإحكام وتنظيف أسطحها الداخلية من الشوائب ثم دهنها بطبقة رقيقة من الزيت.
- تجهيز عينةٍ من الخرسانة تكفي لصنع ثلاث عيناتٍ على الأقل أو حسب العدد المطلوب.
- صب الخرسانة في القالب على ثلاث طبقات بحيث تُدمَك كل منها جيداً (بالهزاز) دون حصول انفصالٍ حبيبيّ أو يدوياً بمعدل 35 ضربة بقضيب الدمك.
- حفظ العينات في جوٍّ رطبٍ خالٍ من الاهتزازات مع تغطيتها إن أمكن لتقليل تبخر الماء من العينة لمدة 24 ساعة.
- فك القوالب بعد مضي 24 ساعةً واستخراج العينات ووضعها في حوض المعالجة لحين إجراء الاختبار عليها.
- إخراج العينات من الحوض وتنشيفها من قطرات الماء العالقة ووضعها في آلة الاختبار.
- إجراء الاختبار على العينات مع مراعاة أن يكون محور العينة منطبقًا على المحور الرأسي للآلة وأن يكون سطحا العينة المعرضان للضغط أملسَين وناعمَين.
- تحميل العينة تدريجياً حسب نوع العينة وأبعادها بحملٍ تدريجي يبدأ من الصفر حتى الانكسار.

- تسجيل النتائج في جدولٍ خاصٍّ يحدد أبعاد العينة ومواصفاتها وتاريخ الاختبار وعمر العينة وغير ذلك، وبعد الانتهاء من الاختبار تُحدَّد مقاومة كسر كلِّ عينةٍ كما يلي: تساوي مقاومة كسر العينة الخرسانية مقدرة بالـ kg/cm^2حمولة الكسر مقدرة بالـ kg مقسومة على مساحة مقطع العينة بالـcm^2 ، ثم تُجرى العمليات الإحصائية المطلوبة لتحديد المقاومة المميزة على الضغط للخرسانة المدروسة.

عوامل التصحيح:Correction Coefficients

يُفترض إجراء التصحيح اللازم لنتائج كسر العينات عندما تختلف أبعادها وأشكالها عن العينات القياسية، أو عندما يختلف عمر العينات عن 28 يومًا، إذ إن طبيعة انكسار العينات في الضغط تختلف وفقًا للشكل والأبعاد، إضافةً لنعومة سطح التلامس بين مستويات الاستناد وسطح العينة.

الجدول (2): عوامل التصحيح لاختلاف الشكل والأبعاد (وفقًا للكود العربي السوري):

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

وبالنسبة للتصحيح المتعلق بالعمر لا توجد علاقة متفق عليها بين المقاومة المبكرة والمقاومة عند عمر 28 يوم.

يقدم الكود السوري جدول يبين عوامل تصحيح اختبارات الضغط لاختلاف العمر:

الجدول (3): عوامل التصحيح لزمن الاختبار(وفقًا للكود العربي السوري):

عمر الخرسانة باليوم	3	7	28	60	90	360 أو أكثر
اسمنت بورتلاندي عادي	2.50	1.50	1.00	0.95	0.90	0.80
اسمنت بورتلاندي سريع التصلب	1.80	1.30	1.00	0.97	0.95	0.90

عموماً النمط العام للعلاقة بين مقاومة الضغط من جهة وزمن الاختبار من جهة أخرى تكون من الشكل:

$$R_{c28} = R_{cj} \times \frac{R_d \times (j-28)+28}{j}$$

حيث: R_{c28} المقاومة على الضغط بعمر 28 يوم للعينة المختبرة

R_{cj} المقاومة على الضغط بعمر j يوم للعينة الخرسانية

R_d معامل يتعلق بسرعة تصلب الاسمنت ويأخذ القيم التالية:

الجدول (4): قيم معامل التصحيح (Rd) وفق سرعة تصلب الاسمنت المستخدم

سرعة التصلب	قيم المعامل Rd
سريع	0.9
عادي	0.83
بطيء	0.8

بعد حساب المقاومة R_{c28} المصححة والمعدلة بحسب الشكل والأبعاد وعمر العينة نقوم بحساب المتوسط الحسابي لمقاومة البيتون على الضغط بعد 28 يوم وفق العلاقة:

$$f_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^{n} R_{c28}}{n}$$

حيث n عدد العينات المختبرة.

وتكون بالتالي المقاومة المميزة المعتمدة للبيتون في التصاميم الهندسية f_c' بالعلاقة:

$$f_c' = f_{cm} - k \times s$$

حيث k ثابت احصائي يتوقف على عدد الاختبارات المنفذة ويعطى وفق الكود العربي السوري كالآتي:

عدد العينات المختبرة	n >30 samples	15< n <30	15 > n
قيم الثابت الاحصائي k	1.31	1.34	1.37

أما S فيعبر عن الانحراف المعياري ويعطى بالعلاقة:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(R_{c28} - f_{cm})^2}{n-1}}$$

ملاحظات هامة لضبط الجودة:

- عند زيادة قيم الانحراف المعياري عن 8 MPa يجب إيقاف عملية الصب وإنتاج الخلطة للتحقق من المكونات والنسب وطريقة الصب.
- يجب ألا يزيد عدد الاختبارات المحتمل أن تنخفض مقاومتها عن المقاومة المميزة على 10% من مجمل العينات المختبرة، كذلك يجب ألا يقل عدد العينات المختبرة عن 15 عينة.
- يجب عموماً ألا تقل مقاومة أي عينة مختبرة عن المقاومة المميزة بأكثر من 3 MPa.

تطبيق عملي:

تم إجراء تجربة الضغط على مجموعة من عينات البيتون المصنوعة من الاسمنت سريع التصلب (Type III) واللازمة لتنفيذ منشأ شديدة الأهمية، فكانت نتائج الاختبار كما هو موضح بالجدول التالي حسب شكل العينة المختبرة وعمرها بعد الصب.

المطلوب حساب المقاومة المميزة للبيتون (f'_c) الداخلة في تصميم العناصر الانشائية البيتونية.

رقم العينة	شكل العينة	أبعاد العينة (cm)	العمر (day)	قوة الكسر (kN)
1	مكعب	10×10×10	28	**430**
2	مكعب	10×10×10	28	**420**
3	مكعب	15×15×15	7	**690**
4	مكعب	20×20×20	3	**980**
5	موشور	30×15×15	28	**750**
6	موشور	45×15×15	14	**760**
7	موشور	45×15×15	7	**640**
8	اسطوانة	30×15	12	**560**
9	اسطوانة	30×15	13	**570**
10	اسطوانة	20×10	28	**320**

الحل: نشكل الجدول التالي وفق المعطيات الموضحة أدناه:

إجهاد الكسر= (قوة الكسر/سطح العينة) مع الانتباه إلى الضرب بـ 100 للتحويل من kN إلى kg على اعتبارها الواحدة الشائعة في الورش والتنفيذ.

معامل تصحيح الشكل يؤخذ من الجدول الخاص بتصحيح الشكل في الكود العربي السوري

معامل تصحيح العمر يؤخذ وفق العلاقة $\frac{R_d \times (j-28)+28}{j}$ على اعتبار Rd=0.9 وفق الجدول (4) لأن الاسمنت سريع التصلب فرضاً.

رقم العينة	شكل العينة	أبعاد العينة (cm)	العمر (day)	قوة الكسر (kN)	إجهاد الكسر (kg/cm^2)	معامل تصحيح الشكل	معامل تصحيح العمر (R_d=0.9)	المقاومة المصححة R_{C28} (kg/cm^2)
1	مكعب	10×10×10	28	430	**430**	0.78	1.0	**335.40**
2	مكعب	10×10×10	28	420	**420**	0.78	1.0	**327.60**
3	مكعب	15×15×15	7	690	**307**	0.8	1.3	**318.93**
4	مكعب	20×20×20	3	980	**245**	0.83	1.8	**372.81**
5	موشور	30×15×15	28	750	**333**	1	1.0	**333.33**
6	موشور	45×15×15	14	760	**338**	1.05	1.10	**390.13**
7	موشور	45×15×15	7	640	**284**	1.05	1.30	**388.27**
8	اسطوانة	30×15	12	560	**317**	1	1.13	**359.33**
9	اسطوانة	30×15	13	570	**323**	1	1.12	**359.95**
10	اسطوانة	20×10	28	320	**408**	0.97	1	**395.41**

المتوسط الحسابي للمقاومات المحسوبة:

$$f_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^{n} R_{c28}}{n} = \frac{3581.17}{10} = 358.1\ kg/cm^2$$

نقوم بحساب الانحراف المعياري (للتعبير عن عدم تجانس المقاومات المحسوبة وبالتالي تشتت قيم المقاومة المحسوبة عن المتوسط الحسابي)

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(R_{c28} - f_{cm})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{7142.7}{10-1}} = 28.17\ kg/cm2 = 2.817\ MPa$$

وبالتالي تكون المقاومة المميزة للبيتون على اعتبار الثابت الاحصائي $k=1.37$ $for\ n<15$:

$$f_c' = f_{cm} - k \times s$$

$$f_c' = 358.1 - 1.37 \times 28.17$$

$$f_c' = 319.5\ kg/cm^2$$

$$f_c' = 31.95\ MPa$$

وهي المقاومة اللازم اعتمادها عند تصميم العناصر الانشائية البيتونية

ملاحظات هامة لتقييم نتائج اختبار العينات:

- المقاومة المميزة المحسوبة للبيتون $(f_c' = 319.5\ kg/cm2)$ قريبة جداً من أصغر مقاومة تجريبية حصلنا عليها بالتجربة المخبرية ($Rc28_{min}$ =318.39 kg/cm^2) ، حيث يجب عموماً ألا تقل مقاومة أي عينة مختبرة عن المقاومة المميزة بأكثر من 3 MPa.
- كلما ابتعدت قيم المقاومة المميزة f_c' عن المقاومة الوسطية كلما كان ذلك مؤشر على ضعف ضبط الجودة في المجبل أو الورشة، وكلما زادت أهمية المنشأ كلما كان الفارق بين المقاومة المميزة والمقاومة الوسطية أصغرياً.
- بحسب الكود الأميركي (ACI- 214R) تصنف جودة الخلطة على أنها جيدة إذا كانت قيم الانحراف المعياري (S<4.1 MPa) ، من قيمة الانحراف المعياري المحسوبة في مثالنا للعينات المختبرة (S=2.81MPa) نجد أن تصنيف جودة الخلطة جيد.
- عدد عينات الاختبار n يجب ألا يقل عن 15 عينة في حال تصميم الخلطة ولايقل عن 30 عينة في حال ضبط الجودة خلال التنفيذ بالموقع، في مسألتنا عدد الاختبارات 10 فقط وهو غير كاف.

مدرس المقرر: د.م مهند سليم مهنا