خواص واختبارات الخرسانه المتصلده

Properties and Testing of Hardened Concrete

1- مقاومة الضغط Compressive Strength

إن مقاومة الضغط هى أهم خواص الخرسانة المتصلدة على الإطلاق وهى تعبر عن درجة جودتها وصلاحيتها، ومقاومة الضغط هى المقاومة الأم للخرسانة حيث أن معظم الخواص والمقاومات الأخرى مثل الشد و الانحناء والقص والتماسك مع حديد التسليح تتحسن وتزيد بزيادة مقاومة الضغط والعكس صحيح. لذلك يجرى اختبار الضغط بغرض التحكم فى جودة إنتاج الخرسانة فى موقع المشروع.

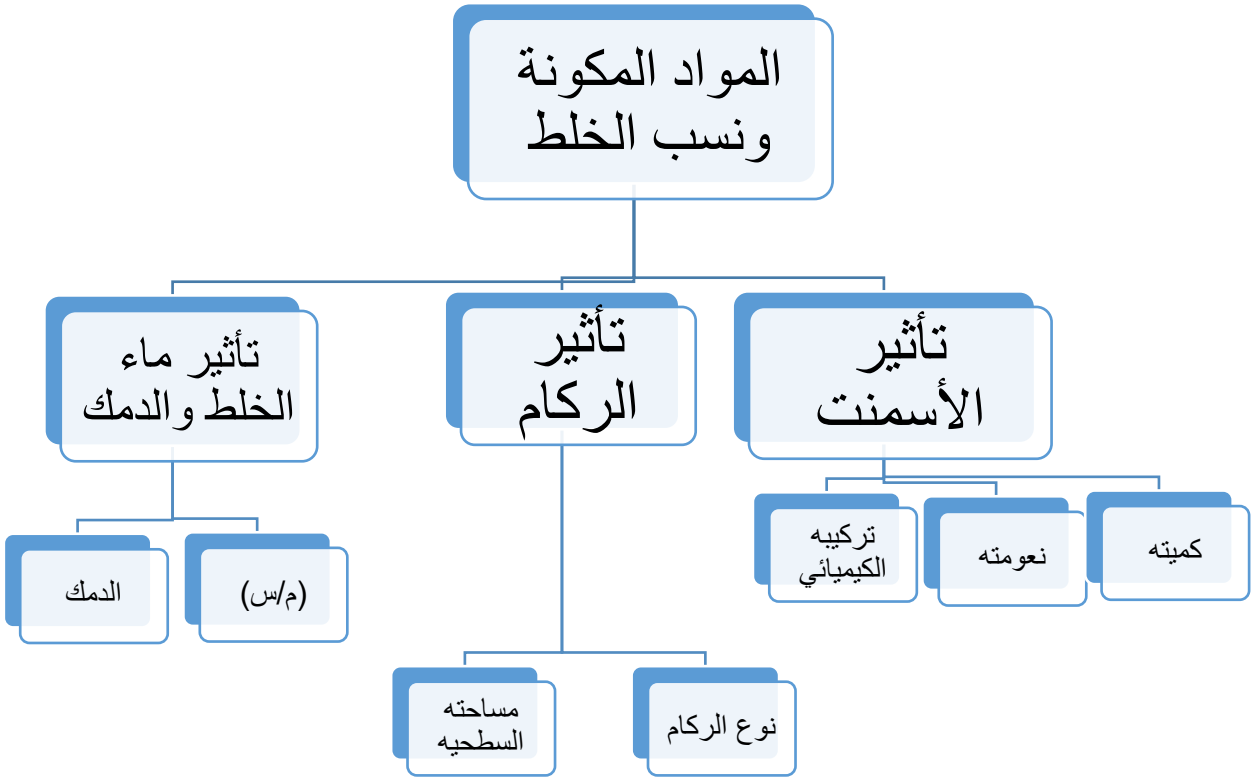
وتكون مقاومة الضغط لخرسانة المنشآت التقليدية تتراوح بين ٢٥٠-٣٥٠ كج/سم^{٢} أما بالنسبة للمنشآت الخاصة والوحدات سابقة التجهيز فمقاومة الضغط تزيد عن ذلك وتصل إلى 400-٥٠٠ كج/سم^{٢} والوحدات الخرسانية سابقة الإجهاد يجب أن تكون ذات مقاومة للضغط تزيد عن ٤٠٠ كج/سم^{٢} وقد تصل إلى ٦٠٠ كج/سم^{٢}

1.1- العوامل المؤثره على مقاومة الضغط

تتأثر مقاومة الضغط بعوامل عديدة ومتنوعة تتلخص في:

- المواد المكونة ونسب الخلط.

- ❑طرق صناعة الخرسانة من خلط ونقل وصب ودمك.
- ❑العمر وظروف المعالجه.
- ❑ظروف الاختبار.



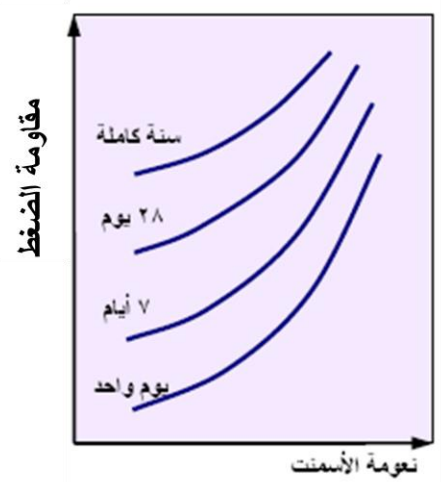
أولا: تأثير الأسمنت

الأسمنت هو المكون الرئيسي الفعال الذى تتوقف عليه مقاومة الخرسانة وأهم العوامل المؤثرة فى الأسمنت هى **كميته ونعومته وتركيبه الكيميائي**. فنجد أن مقاومة الخرسانة تزيد بزيادة محتوى الأسمنت وذلك حتى محتوى معين يقل بعده معدل الزيادة فى المقاومة ثم تتوقف الزيادة فى المقاومة بعد ذلك وربما تقل. وعموماً فقد وجد أن المحتوى الأقصى للأسمنت الذى يعطى أعلى مقاومة ضغط للخرسانة يقع بين ٤٥٠ و ٥٥٠ كج/م^{٣}. أما بالنسبة لنعومة الأسمنت فهي تؤثر تأثيراً كبيراً على مقاومة الخرسانة وخاصة فى

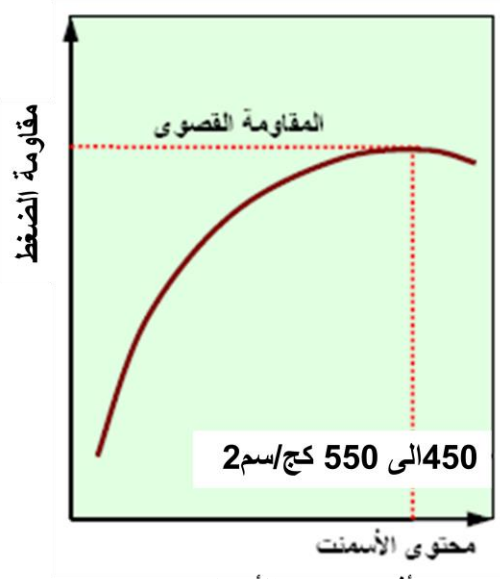
الأعمار المبكرة حتى ٢٨ يوم. بعد ذلك يقل معدل الزيادة فى المقاومة تدريجياً بتقدم عمر الخرسانة حتى يكاد ينعدم عند الأعمار المتأخرة جداً.

أما بالنسبة لتأثير التركيب الكيميائي للأسمنت فيعتمد ذلك بصورة كبيرة على نسب المكونات الرئيسية للأسمنت وأهمها بالنسبه لمقاومة الضغط هي سيليكات ثنائي الكالسيوم C_2S وسيليكات ثلاثي الكالسيوم C_3S فهما الذين يتحكمان فى المقاومة ويتراوح مجموع نسبتيهما حوالى ٧٥%. وعموماً فإن الأسمنت الذى يحتوى على نسبة عالية من C_3S يكتسب مقاومة أسرع من الأسمنت المحتوى على نسبة عالية من C_2S حيث أن C_3S هو المركب المسئول عن المقاومة المبكرة للأسمنت.

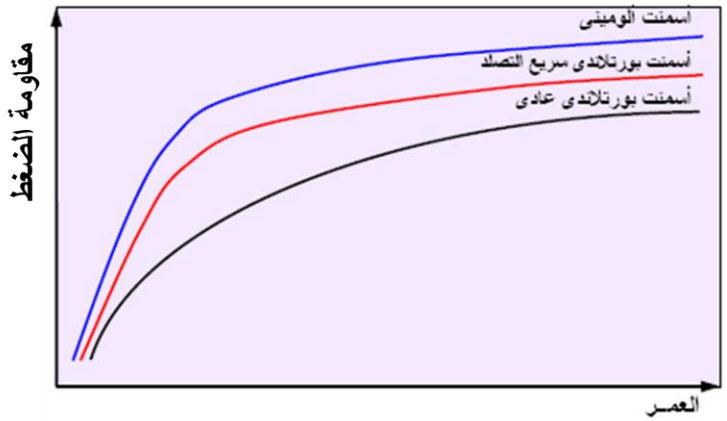
وبالتحكم فى نسبة المكونات الرئيسية للأسمنت وكذلك نعومته يمكننا صناعة الأنواع المختلفة من الأسمنت مثل الأسمنت سريع التصلد والأسمنت البورتلاندى العادي والأسمنت فائق النعومة والأسمنت المقاوم للكبريتات.



تأثير نعومة الأسمنت



تأثير محتوى الأسمنت



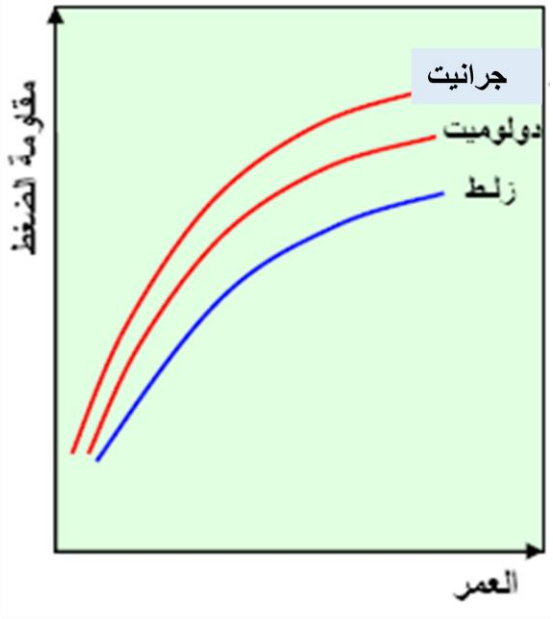
تأثير نوع الأسمنت على مقاومة الضغط

ثانيا: تأثير الركام

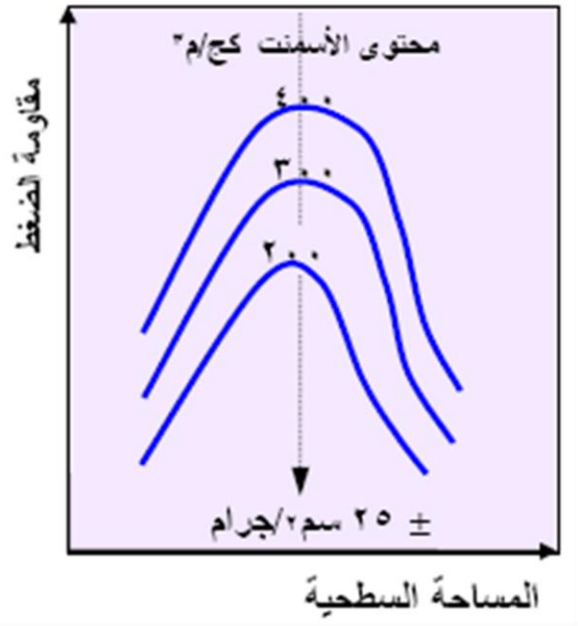
الركام هو المادة المالئة بالخرسانة والتى يُفترض أنها خاملة كيميائياً. وعموماً فإن مقاومة الخرسانة تتوقف على التماسك بين العجينة الأسمنتية والركام المستخدم حيث ينبغي أن تغلف العجينة الأسمنتية بكفاءة أسطح الركام المستخدم ومن ثم نجد أن **نوع الركام وشكله ونعومته ومساحته السطحية وطبيعة سطحه** من العوامل الرئيسية التى تؤثر على مقاومة الخرسانة.

1- **نوع الركام:** نجد أن الحجر الجيري أو الدولوميت يعطى مقاومة أكبر من الزلط.

2- ومساحته السطحيه: فتؤثر تأثيراً كبيراً على مقاومة الضغط حيث نجد أنه عند مساحة سطحية حوالى ٢٥سم^{٢}/جم فإننا نحصل على المقاومة القصوى التى تقل تدريجياً إذا زادت المساحة السطحية أو قلت عن ذلك ومساحة الركام السطحية تعتمد على نسبة الركام الصغير إلى الركام الكبير وكذلك على نعومة أو خشونة الركام المستخدم.



تأثير نوع الركام

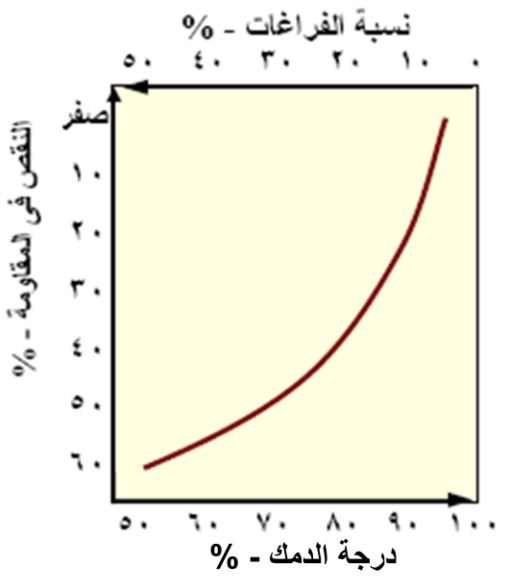


تأثير المساحه السطحيه للركام

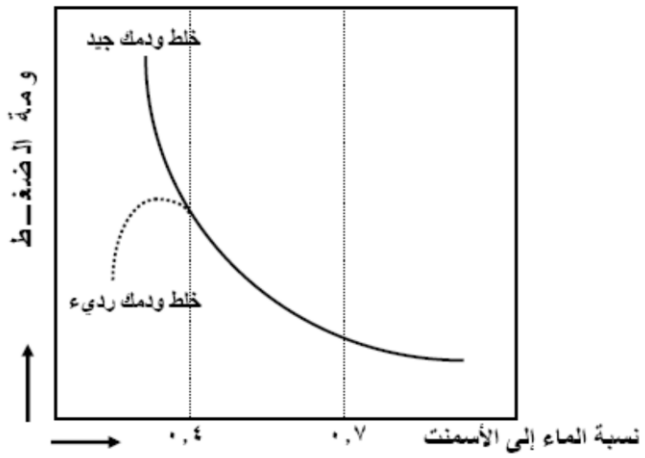
ثالثا: تأثير ماء الخلط والدمك

إن تأثير نسبة الماء إلى الأسمنت (م/س) هو بلا شك من أهم العوامل التى تؤثر ليس فقط على مقاومة الخرسانة بل أيضاً على متانتها, وعموماً فإن تقليل الماء فى الخلطة إلى درجة معينة هو أساس الحصول على الخرسانة عالية المقاومة High Strength Concrete أو الخرسانة عالية الأداء High Performance Concrete.

مقاومة الخرسانة تتأثر تأثراً كبيراً بدرجة دمكها حيث أن الدمك الغير جيد يؤدى إلى وجود فراغات هوائية فى الخرسانة تعمل على تقليل المقاومة وتدهور الخرسانة.



تأثير الدمك

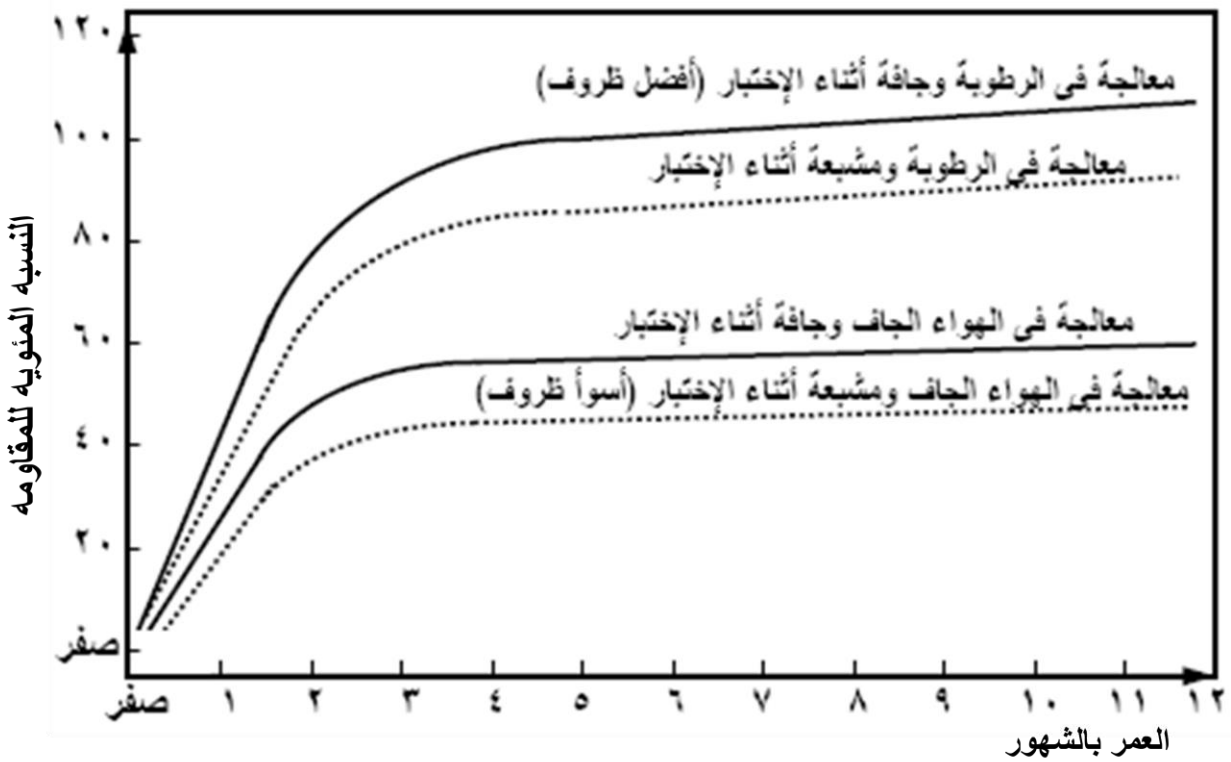


تأثير (م/س) على مقاومة الضغط

رابعا: تأثير العمر والمعالجه

إن زيادة مقاومة الخرسانة مع الزمن Strength Gain يتوقف بدرجة كبيرة على الظروف المحيطة بها وكذلك على ظروف المعالجة من حيث مدتها ودرجتي الرطوبة والحرارة. فكلما زادت فترة معالجة الخرسانة فى الرطوبة كلما زادت مقاومتها. كما أن الخرسانة المعالجة فى الهواء تظهر مقاومة أقل كثيراً من الخرسانة المعالجة تحت الماء. إن الخرسانة المعالجة فى الهواء مع تعرضها لدورات الجفاف يقيد عملية الإماهة وربما يوقفها ومن ثَمَ تتوقف الزيادة فى المقاومة. ولقد أوضحت الاختبارات أن الخرسانة المعالجة فى الماء تظهر مقاومة أعلى بمقدار مرتين أو أكثر من مقاومة الخرسانة الغير معالجة. وعموماً فإن المعدل الذى تتحسن به المقاومة يكون كبيراً فى الأعمار المبكرة خاصة فى الأسابيع الأربعة الأولى ويقل تدريجياً مع تقدم

العمر. ولذلك تم اعتبار المقاومة بعد ٢٨ يوم هى المقاومة القياسية للخرسانة.



معدل زيادة مقاومة الخرسانه مع الزمن في ظروف معالجه مختلفه

هناك علاقات كثيرة تربط مقاومة الخرسانة فى الأعمار المختلفة بمقاومتها عند ٢٨ يوم إلا أن جميع هذه العلاقات تقريبية وتعطى قيم استرشادية فقط. وفى جميع الأحوال ينبغي اختبار الخرسانة بعد ٢٨ يوم حتى نتأكد تماماً من قيمة مقاومة الخرسانة الفعلية. وتجدر الإشارة أن اختبار الضغط بعد ٢٨ يوم لا يعطى قناعة تامة عن حقيقة مقاومة الضغط لبعض أنواع الخرسانة وخاصة تلك المحتوية على إضافات كيميائية مثل معجلات أو مؤخرات الشك وكذلك تلك المحتوية على مواد بوزولانية مثل غبار السيليكا وفى هذه

الحالة ينبغي قياس المقاومة بعد ٥٦ يوم أو ٩٠ يوم على الأقل وذلك حتى تعطى صورة حقيقية عن المقاومه.

وعموماً فإن الكود المصري قد أعطى بعض القيم الاسترشادية للعلاقة بين مقاومة الضغط فى الأعمار المختلفة ومقاومة الضغط بعد ٢٨ يوم وذلك فى حالة الخرسانة المصنوعة فى الظروف العادية والغير محتوية على إضافات.

قيم استرشاديه لنسبة مقاومة الضغط في أعمار مختلفه

عمر الخرسانة (يوم)	٣	٧	٢٨	٩٠	٣٦٥
أسمنت بورتلاندى عادى	٠,٤	٣/٢	١	١,١٨	١,٣٣
أسمنت بورتلاندى سريع التصلد	٠,٥٥	٦/٥	١	١,١١	١,١٨

خامسا: تأثير شكل العينات على مقاومة الضغط

هناك ثلاثة أشكال شائعة للعينات الخرسانية التى تستخدم فى اختبار الضغط وهى: المكعبة والاسطوانية و المنشوريه وقد لوحظ معملياً أن المقاومة المقاسة لخلطة معينة من الخرسانة تختلف باختلاف شكل العينات المختبرة. كما دلت التجارب على أنه لنفس الشكل من العينات تختلف المقاومة المقاسة معملياً باختلاف مقاس العينات المختبرة.

ولقد أُجريت عدة أبحاث معملية بغرض الوصول إلى شكل ومقاس موحد ومناسب للعينات الممكن استخدامها فى اختبار الضغط إلا أنه لا توجد حتى الآن طريقة نظرية أو رياضية لإعطاء حل جازم لهذه المشكلة وبذلك ظلت المواصفات الدولية مختلفة فيما بينها فى اختيار الشكل والمقاس المناسب

لعينات اختبار الضغط فنجد أن المواصفات القياسية البريطانية تنص على استخدام العينات المكعبه مقاس (15,8*15,8*15,8سم) بينما تنص المواصفات القياسية الأمريكية على استخدام العينات الاسطوانية مقاس (15*30سم) ومن ناحية أخرى تنص المواصفات القياسية السويسرية على استخدام العينات المنشورية مقاس (15*15*30سم).

ونظراً للاختلاف الواضح بين المواصفات القياسية الدولية بشأن شكل ومقاس عينات اختبار الضغط فإن الأبحاث العلمية أولت هذا الموضوع اهتماما كبيراً لمحاولة ربط المقاومة المستنتجة من أحد الأشكال بالمقاومة المستنتجة من الأشكال الأخرى.

ولقد بينت الاختبارات أن العلاقة بين مقاومة الضغط للمكعب ومقاومة الضغط للاسطوانة غير ثابتة لأنها تتغير نتيجة اختلاف مقاومة الخرسانة ومقاس الركام الكبير وعوامل أخرى. ويعتبر تولد قوى الاحتكاك بين سطحي عينة الاختبار ورأس ماكينة الضغط من العوامل المؤثرة على تغير العلاقة بين مقاومة الضغط للعينة المكعبة و الاسطوانية و المنشورية حيث تؤثر قوى الاحتكاك على المقاومة الظاهرية للعينات المكعبة. بينما يحدث الانهيار فى العينات الاسطوانية والمنشورية دون تأثير واضح لقوى الاحتكاك وبالتالي نجد دائماً أن مقاومة الضغط للعينة المكعبة أكبر من مقاومة الضغط للعينة الاسطوانية أو المنشورية. وإذا أخذنا المكعب القياسي (15*15*15سم) كأساس للمقارنة فإن الاختلاف فى نتائج اختبار العينات المكعبة و الاسطوانية و المنشورية يكون كما هو موضح بالجدول.

قيم استرشاديه لمعامل التصحيح لنتائج مقاومة الضغط طبقا للكود المصري

شكل القالب	الأبعاد (سم)	معامل التصحيح
مكعب	١٠×١٠×١٠	٠,٩٧
مكعب	١٥×١٥×١٥ أو ١٥,٨×١٥,٨×١٥,٨	١,٠٠
مكعب	٢٠×٢٠×٢٠	١,٠٥
مكعب	٣٠×٣٠×٣٠	١,١٢
اسطوانة	٢٠×١٠	١,٢٠
اسطوانة	٣٠×١٥	١,٢٥
اسطوانة	٥٠×٢٥	١,٣٠
منشور	٣٠×١٥×١٥ أو ٣١,٦×١٥,٨×١٥,٨	١,٢٥
منشور	٤٥×١٥×١٥ أو ٤٧,٤×١٥,٨×١٥,٨	١,٣٠
منشور	٦٠×١٥×١٥	١,٣٢

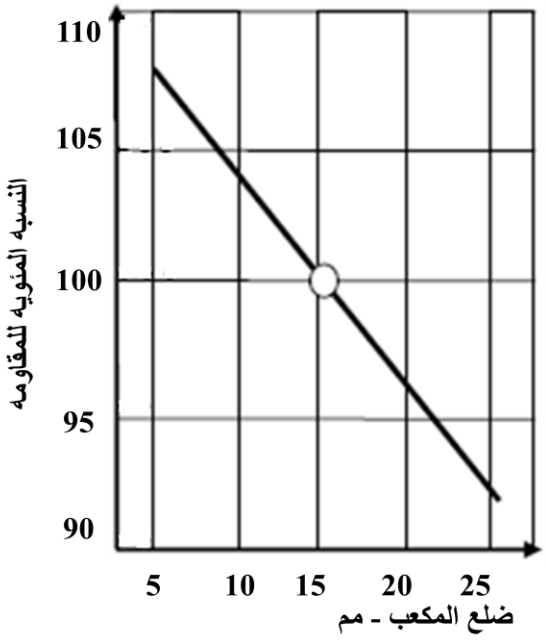
سادسا: تأثير المقاس على مقاومة العينات

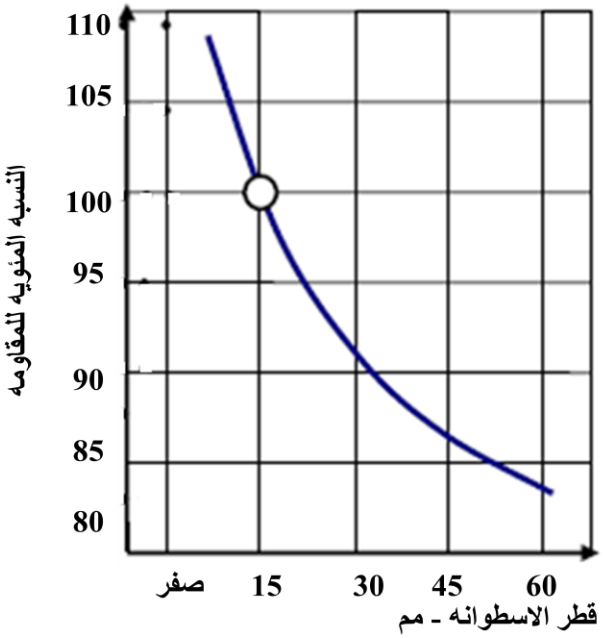
وجد أن مقاومة الخرسانة للضغط تختلف بالنسبة للعينات المتشابهة فى الشكل والمختلفة فى الأبعاد ، فكلما زادت الأبعاد تقل مقاومة الضغط المقاسة معملياً. ولقد أدت هذه الظاهرة بالباحثين إلى محاولة عمل توحيد قياسي على أبعاد عينات اختبار الضغط سواء كانت مكعبة أو اسطوانية أو منشورية الشكل. وبالنسبة للعينات الاسطوانية الشكل نجد أن المقاومة المقاسه تتغير تبعاً لتغير مقاس الاسطوانه كما أنها تتغير أيضا تبعاً لاختلاف نسبة ارتفاع الاسطوانة إلى قطرها (ع/ق)، ويوضح الجدول التالي عامل التصحيح لمقاومة الضغط الذى يضرب فى المقاومة التى يحصل عليها من العينات الاسطوانية غير القياسية وذلك بغرض حساب المقاومة المطلوب الحصول عليها من العينات القياسية المأخوذة من نفس الخلطة والتى يعادل ارتفاعها

ضعف قطرها. ويتضح من الجدول أن المقاومة التى نحصل عليها من العينات التى لها (ع/ق) أقل من ٢ تكون أكبر من المقاومة القياسية مما يستدعى ضربها بعامل تصحيح يقل بقيمته عن الواحد الصحيح تبعاً لنسبة (ع/ق).

عامل تصحيح المقاومه المناظر لنسب (ع/ق) المختلفه للإسطوانه (ASTM)

نسبة الارتفاع إلى القطر (ع/ق)	٢,٠	١,٧٥	١,٥٠	١,٢٥	١,١٠	١,٠٠	٠,٧٥	٠,٥٠
عامل تصحيح المقاومة	١,٠	٠,٩٨	٠,٩٦	٠,٩٤	٠,٩٠	٠,٨٥	٠,٧٠	٠,٣٠





تأثر مقاومة الخرسانه بتغير مقاس العينه

سابعا: ظروف التحميل

تتأثر المقاومة المقاسة لعينات اختبار الضغط بظروف التحميل المؤثرة عليها مثل طبيعة نهايات كلٍ من عينة الاختبار وماكينة الضغط وكذلك الاحتكاك الناشئ بين سطحي العينة وماكينة الاختبار.

1- طبيعة نهايات العينه

يلاحظ أن إستواء سطحي التحميل أو سطحي (وسادتي التحميل) يؤثر تأثيراً واضحاً على المقاومة المقاسة لعينة الإختبار حيث أن أي نسبة من الانحناء الناشئ فى هذين السطحين تسبب نقصاً كبيراً فى المقاومة الظاهرية للعينة. ووسادات التحميل هي طبقه رقيقه توضع على السطح السفلى والعلوي لعينة اختبار الضغط لمحاولة التغلب علي خشونة عدم استواء سطح التحميل وتختلف المقاومة المقاسة للعينات ذات الوسائد عن تلك المقاسة للعينات العادية بدون وسائد حيث وُجد أن العينات ذات الوسائد تُظهر مقاومة أعلى من مقاومة العينات العادية القياسية وذلك لأن الوسائد تعمل على توزيع الحمل بانتظام على كامل مقطع العينة المختبرة. ويعتمد اختلاف المقاومة المقاسة على نوع مادة الوسادة وعلى طريقة صبها فوق سطحي العينة.

2- طبيعة أطراف ماكينة الإختبار

توضع عينات الضغط عند اختبارها بين فكي ماكينة الضغط اللذين يشكلان لوحي التحميل المعدنيين. ويجب أن تكون مساحة لوح التحميل المعدني مساوية على الأقل أو أكبر من مساحة سطح العينة المعرض للتحميل. ومن المعروف أنه كلما كانت العينة كبيرة أو ذات مقاومة عالية جداً فإنه يلزمها ألواح تحميل معدنية سميكة حتى لا تكون هذه الألواح مرنة بالنسبة للأحمال الكبيرة التى ستؤثر عليها مما قد يسبب تركيز الإجهادات على سطح العينة. أما إذا كانت عينة الاختبار صغيرة وألواح التحميل المعدنية سميكة نوعا ما فإنه يمكن اعتبار هذه الألواح جاسئة تماما بالنسبة للأحمال الصغيرة التى

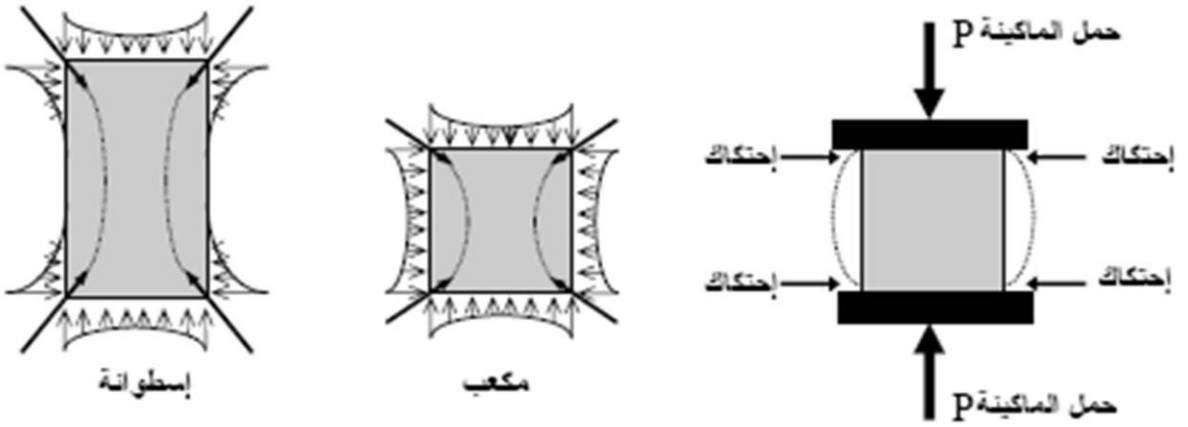
سوف تتعرض لها وبذلك تستطيع هذه الألواح أن تعطى أحمالاً موزعة بانتظام على سطح عينة الاختبار.

3- الإحتكاك بين سطحى العينه وماكينة إختبار الضغط

عند تحميل الأسطح الأفقية لعينة الإختبار تنضغط هذه العينة رأسيا أو تنكمش بسبب إجهادات الضغط الواقعة عليها بينما تحاول جوانب العينة أن تتمدد أفقيا إلا أن حركة التمدد الجانبى هذه سوف تقاوَم بواسطة الإحتكاك الذى ينشأ فى هذه اللحظة بين لوحى التحميل المعدنين والسطحين الأفقيين لعينة الإختبار. وتتولد قوى الإحتكاك هذه بقيمة قصوى عند أطراف سطحى العينة وتقل قيمتها تدريجيا كلما إتجهنا إلى الداخل حتى تتلاشى تماماً. ولقد وجد أن الإحتكاك الناشئ بين سطحى العينة وفكى ماكينة الإختبار يؤثر تأثيراً بالغاً على نتائج الإختبارات ويلعب دوراً كبيراً فى الإختلاف الملحوظ فى نتائج إختبارات العينات الخرسانية ذات الأشكال والمقاسات المختلفة ويرجع هذا إلى أن قوى الإحتكاك المتولدة تحاول أن تقاوم الإنفعال الجانبى للعينة وبذلك فهى - بطريقة غير مباشرة – تقاوم الإنفعال الرأسى الناتج عن التحميل وبذلك تكسب العينة مقاومة زائدة لأحمال الضغط مما يسبب تسجيل مقاومة أعلى للعينة على تدريج ماكينة الإختبار.

ويلاحظ أن تأثير قوى الإحتكاك المتولدة بين سطحى العينة وفكى الإختبار يظهر فى العينات المكعبة بوضوح بالمقارنة مع العينات المنشورية حيث أنه تنعدم إجهادات الإحاطة على جوانب المنشور فى المنطقة القريبة من منتصف الإرتفاع بينما لا تنعدم هذه الإجهادات على جوانب المكعب تقريباً مما يسبب تقوية زائدة للمكعب. وتشبه إجهادات الإحاطة فى حالة الإسطوانة مثيلتها فى حالة المنشور. وذلك يفسر ميل العينات المكعبة بصفة دائمة إلى إظهار مقاومة ضغط أعلى من المقاومة التى تظهرها عادة الإسطوانة أو

المنشور. كذلك يزيد تأثير قوى الإحتكاك وإجهادات الإحاطة الناتجة عنها لنفس العينات المكعبة كلما صغُر مقاس تلك العينة وبذلك تظهر العينات المكعبة صغيرة المقاس مقاومة أعلى من المقاومة التى تظهرها العينات المكعبة كبيرة المقاس.



تأثر الإحتكاك بين العينه والماكينه

4- معدل التحميل

عند إختبار عينات الضغط لوحظ أنه كلما أسرعنا من معدل التحميل فإن هذه العينات تُظهر مقاومة أعلى للضغط. ولذلك فإنه ينبغى أن تحمل العينات الخرسانية المكعبة بحمل ضغط بحيث لاينتج عنه أى صدم على العينة ثم يزداد الحمل تدريجيا بمعدل ١٤٠ كج/سم^{٢}/دقيقة حتى لحظة تسجيل العينة لأقصى حمل على ماكينة الإختبار. ولقد أظهرت بعض الدراسات المعملية أن زيادة فترة التحميل بحيث تصل إلى عدة أيام تسبب نقصا كبيراً فى المقاومة المقاسة بالإضافة إلى أن الإنفعالات المقاسة للعينة تكون أكبر بكثير من المعتاد.

5- إتجاه التحميل

عند اختبار العينات المكعبة فإن تحميلها فى ماكينة الضغط يكون إما فى إتجاه الصب أو فى الإتجاه العمودى عليه ويؤثر إتجاه تحميل العينة بالنسبة لإتجاه الصب تأثيراً واضحاً على مقاومة العينة للضغط. ويُلاحظ أنه بالنسبة للعينات الإسطوانية أو المنشورية الشكل فإن إتجاه التحميل يكون دائماً فى إتجاه الصب بينما يكون إتجاه التحميل فى العينات المكعبة عمودياً على إتجاه الصب وذلك بغرض جعل الأسطح المصقولة للمكعب ملامسة لرأس ماكينة الإختبار. ولقد أظهرت بعض الأبحاث التى أُجريت بهذا الشأن أن العينات التى تُختبر بحيث يكون إتجاه التحميل المؤثر عليها مطابقاً لإتجاه الصب تُظهر مقاومة أكبر بحوالى ٨% من المقاومة التى تُظهرها العينات التى تُختبر بإتجاه تحميل عمودى على إتجاه الصب. بينما أظهرت دراسات أخرى أن الخرسانة إذا كانت غنية بالأسمنت ومخلوطة ومدموكة جيداً فإن تأثير إتجاه التحميل على مقاومة الضغط المقاسة يتلاشى تقريباً خصوصاً إذا كان التحميل مؤثراً بحيث يعطى إجهادات موزعة بإنتظام على سطح العينة طوال فترة الإختبار.

2.1- أشكال الإنهيارات المحتمله للخرسانه تحت تأثير حمل الضغط

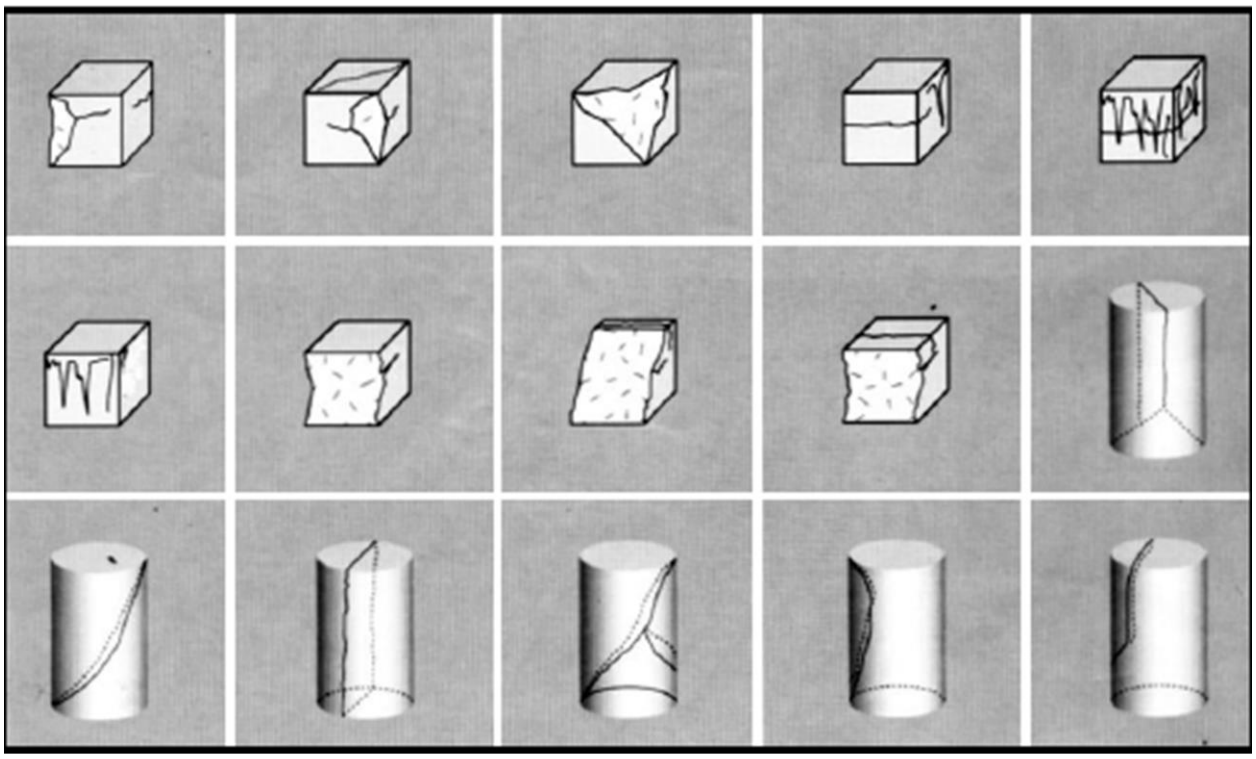
إن الانهيارات الحادثة فى العينات على إختلاف أشكالها نتيجة إختبارات الضغط نادراً ما تكون بسبب إجهادات الضغط فقط وإنما هى فى الغالب إنهيار قص أو إنهيارات شد ضلعى. هذا بالإضافة إلى أن الإنهيارات التى تحدث فى عينات الإختبار تختلف فى أشكالها كليا عن الإنهيارات الممكن حدوثها فى العناصر الخرسانية فى المنشأ. ومن خلال الدراسات المعملية يمكن ملاحظة أن عينات إختبار الضغط القصيرة نسبيا مثل المكعبات والإسطوانات القياسية تتأثر بإجهادات الإحاطة الجانبية الواقعة عليها من إحتكاك نهايتها مع رأس الماكينة فتنهار على شكل مخروط ناقص وهذا

الشكل المخروطى ناتج عن تأثير إجهاد الضغط المحورى مضافاً عليه إجهادات الإحاطة الجانبية.

شكل انهيار صحيح لعينات إختبار في الضغط

بينما يلاحظ أنه لو حاولنا ملاشاة الإحتكاك الناشئ من نهايات العينة ورأس الماكينة بواسطة طبقة من الزيت تفصل بينهما فإن إجهادات الإحاطة تقل وبالتالى تقل مركبة القوى الأفقية المؤثرة على العينة ويتحول شكل الإنهيار الحادث إلى شكل إنفلاق Splitting.

وقد تحدث بعض الأخطاء أثناء التأثير بالحمل نتيجة عدم مركزية الحمل أو عدم إستواء أوجه العينة أو أى أسباب أخرى مما يؤدى إلى حدوث الإنهيار بشكل غير طبيعى أو غيرصحيح وغالباً تكون المقاومة الحقيقية لهذه العينات أكبر من القيمة التى تقرأها الماكينة بنسبة قد تصل إلى 30%.



شكل انهيار غير صحيح لعينات إختبار في الضغط

2.1

اختبار مقاومة الضغط Compressive Strength Test

يجرى إختبار تحديد مقاومة الضغط للخرسانة المتصلدة عادة بعد مرور ٢٨ يوماً على صب العينات وفى بعض الأحيان بعد ٧ أيام أو بعد فترة أخرى حسب الحاجة.

عينات الاختبار :

تكون عينة الإختبار بشكل مكعب طول ضلعه ١٥,٨ سم أى مساحة الوجه = ٢٥٠سم٢ أو مكعب طول ضلعه ١٥سم أو إسطوانة قطرها ١٥سم وإرتفاعها ٣٠سم.

طريقة إجراء الاختبار:

- توزن الكميات اللازمه من الأسمنت والركام الصغير والركام الكبير والماء ويراعى عند حساب الوزن أن تزيد كمية الخرسانة المخلوطة عن الخرسانة اللازمة لملئ القوالب بحوالى ١٥% وذلك لتعويض أى فقد أو هالك قد يحدث أثناء الإختبار
- يُعد قالب الإختبار وتُغطى أوجه القالب الداخلية بطبقه رقيقه من الزيت الخفيف.
- تخلط مكونات الخرسانة إما ميكانيكياً أو يدوياً خلطاً جيداً حتى يصبح لونها متجانس.
- بمجرد الإنتهاء من الخلط تُجرى إختبارات القوام (الهبوط مثلاً) وأى إختبارات أخرى تكون مطلوبة مثل إختبارات القابلية للتشغيل (عامل الدمك أو فى بى) أو إختبار تحديد نسبة الهواء فى الخلطة.
- بعد إختبارات الخرسانة الطازجة يُملأ القالب مباشرة بالخرسانة على ٣ طبقات وتدمك كل طبقة إما بماكينة الإهتزاز أو يدويا حتى تدمك الخرسانة دمكاً تاماً دون حدوث إنفصال حبيبى.
- تغطى القوالب بعد صبها مباشرة وتوضع فى مكان درجة حرارته ١٥ إلى ٢٠درجة مئوية لفترة ٢٤ساعة ويلاحظ أن لا تتعرض لأى إهتزازات.
- تُعلم العينات الخرسانية بعد ذلك ثم تفك من القوالب وتُغمر فى الحال فى ماء نقى درجة حرارته حوالى ١٥-٢٠درجة مئوية وتُترك حتى وقت الإختبار ويُفضل ترك مسافات بين المكعبات وبعضها فى أحواض المعالجة كما يُنصح بعدم وضع المكعبات فوق بعضها.
- تختبر العينة بوضعها بماكينة الإختبار حيث يكون محورها منطبقاً مع محور رأس الماكينة وفى حالة العينة المكعبة يلزم أن يكون وجهى

العينة الملامسين لسطحى رأس الماكينة هما الوجهين المقابلين للسطح الداخلى للقالب المعدنى لضمان استوائهما وتوازيهما. أما فى حالة العينة الإسطوانية فيلزم عمل مخدة Capping لسطح كل من نهايتى الإسطوانة بطريقة تجعل سطح النهايتين مستويين ومتوازيين.

- ولكل إختبار تختبر ثلاث عينات وتؤخذ القيمة المتوسطة للنتائج.
- تعرض العينة لحمل ضغط محورى بمعدل حوالى ١٤٠كج/سم٢/دقيقة حتى الكسر وتدون النتائج فى جدول كما يلى:

رقم العينة	التاريخ	عمر الخرسانة	وزن العينة	أبعاد العينة	مساحة الوجه	حمل الكسر	مقاومة الضغط كج/سم٢
١ ٢ ٣	تاريخ الصب تاريخ الكسر	٧ أيام					
٤ ٥ ٦	تاريخ الصب تاريخ الكسر	٢٨ يوم					

وضع المكعب والإسطوانه في ماكينة الضغط

شكل الكسر فى عينات خرسانيه مكعبه بعد إجراء إختبار الضغط عليها

2- مقاومة الشد Tensile Strength

1.2- العلاقه بين مقاومتي الشد والضغط

تتحمل الخرسانة العادية المتصلدة مقاومة الضغط بدرجة كبيرة ولذلك يجرى تصميم الخرسانة بإعتبارها تقاوم إجهادات الضغط أساساً أما بالنسبة لمقاومتها لقوى الشد (سواء المباشر أوغير المباشر) فإنها تعتبر ضعيفة المقاومة للشد إذا ما قورنت بمقاومتها للضغط ويرجع هذا لكونها مادة قصفة ومع ذلك إهتم الباحثون بمقاومة الشد فى الخرسانة لأن حدوث معظم التشققات والشروخ فيها ناتج عن صغر مقاومتها للشد. ومقاومة الشد فى الخرسانة تتراوح ما بين ٧% إلى ١٤% من مقاومتها للضغط أى بنسبة متوسطة قدرها ١٠% وتختلف هذه النسبة تبعاً لعمر الخرسانة وكذلك تعتمد هذه النسبة على رتبة الخرسانة .

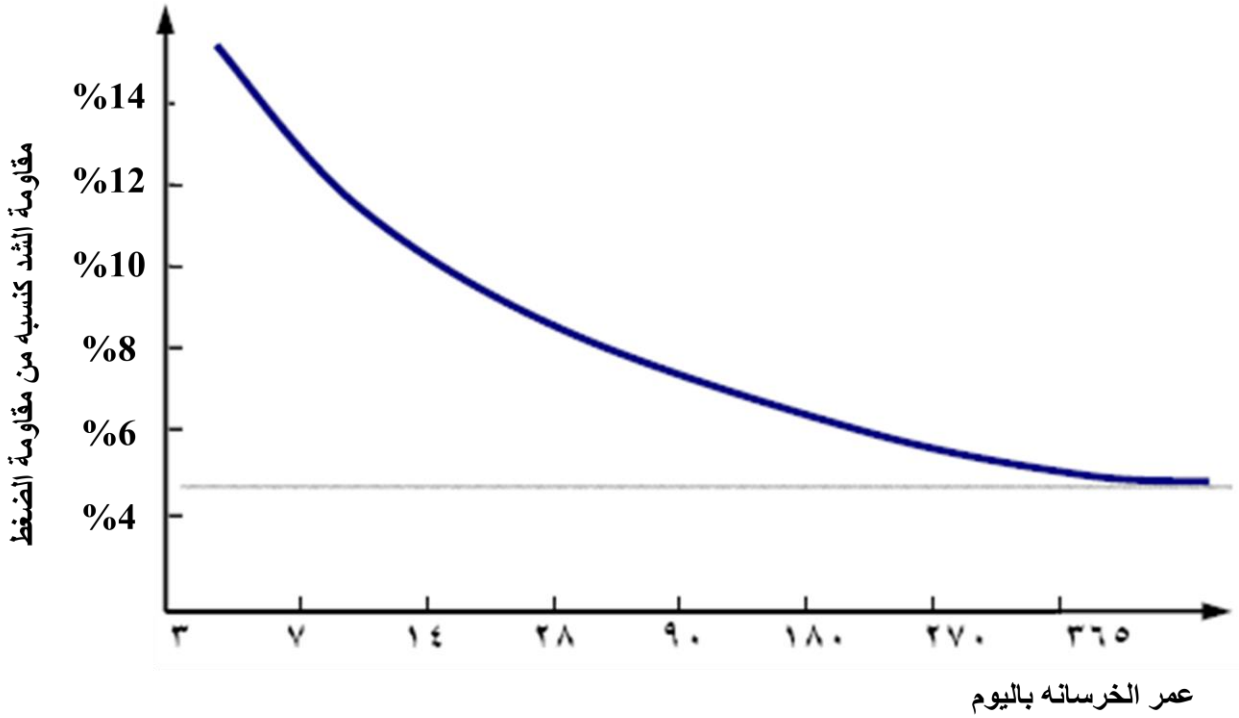
ويلاحظ أنه كلما زادت مقاومة الخرسانة للضغط كلما قلت الزيادة النسبية لمقاومة الشد إلى أن تصل مقاومة الضغط إلى حوالى ٨٠٠ كج/سم٢ عندها تصل مقاومة الشد إلى أقصى قيمة لها والتى تتراوح من ٦٠ إلى ٧٠ كج/سم٢. ويمكن إستخدام المعادلتين التاليتين فى حساب مقاومة الشد للخرسانة:

١- للأعمار المبكرة

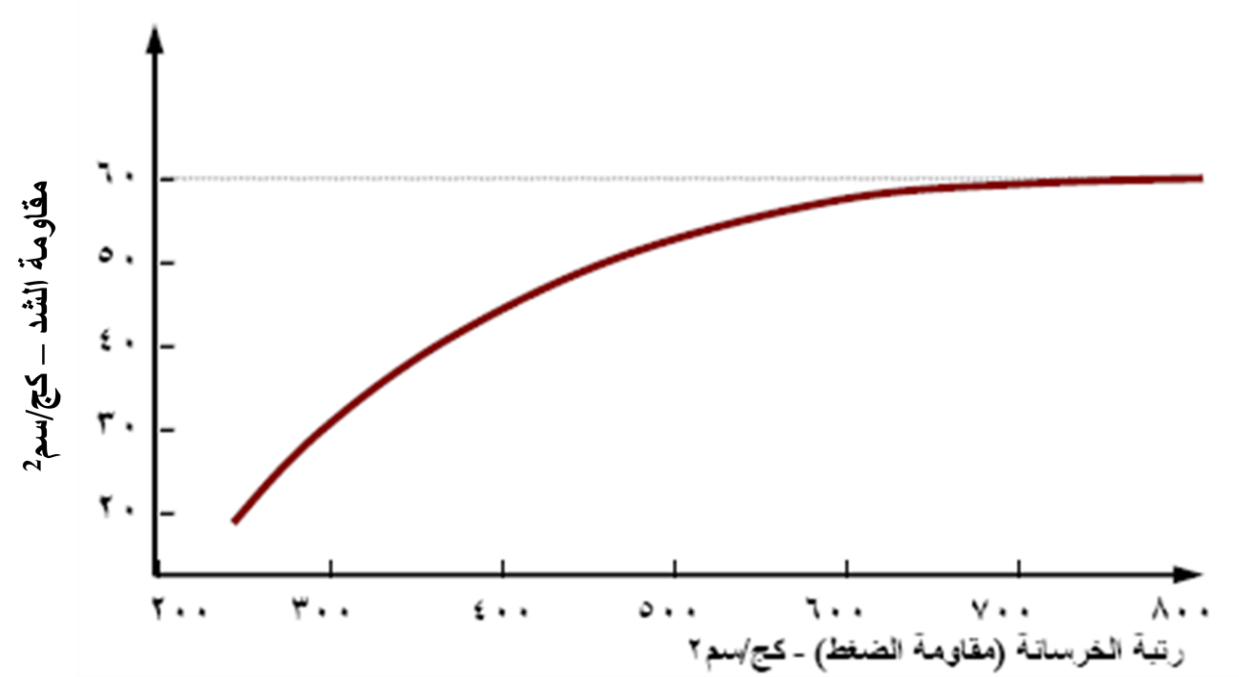
$$\frac{\text{مقاومة الشد}}{\text{مقاومة الضغط}} = \frac{١}{٨} : \frac{١}{١٢} = ١٠\%$$

٢- للأعمار المتأخرة

$$\frac{\text{مقاومة الشد}}{\text{مقاومة الضغط}} = \frac{١}{٢٠} = ٥\%$$



اختلاف مقاومة الشد بإختلاف عمر الخرسانه



اختلاف مقاومة الشد بإختلاف رتبة الخرسانه

2.2- طرق إختبار مقاومة الشد للخرسانه

يمكن تعيين مقاومة الشد فى الخرسانة بعد ٧ أيام أو ٢٨ يوم أو أى مدة أخرى بطرق مباشرة وغير مباشرة كما يلى:

أولا: إختبار الشد المباشر Direct Tensile Strength

- تحضر العينات للإختبار بإجراء عمليات الخلط والصب والدمك والمعالجة بنفس الطريقة السابق ذكرها فى إختبار الضغط.
- يجرى الإختبار بمسك العينة عند نهايتيها بماكينة الإختبار والتأثير بحمل الشد تدريجيا وببطء ويعين الحمل المسبب لكسر العينة حيث تنكسر معظمها فى المنتصف وتحسب مقاومة الشد فى هذه الحالة بقسمة الحمل الأقصى على مساحة مقطع العينة.

$$\text{مقاومة الشد المباشر} = \frac{\text{الحمل الأقصى}}{\text{مساحة المقطع}} = \frac{P_{max}}{A} \quad \text{كج/سم}^2$$

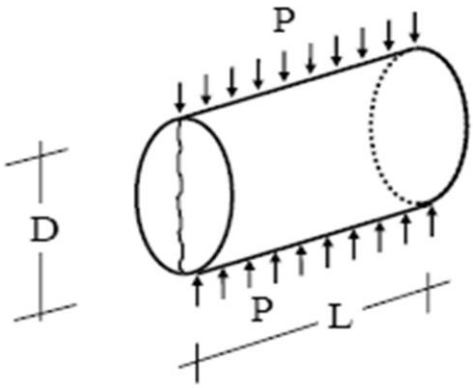
اشكال العينات الخرسانيه في اختبار الشد المباشر

ونظراً لصعوبة إجراء إختبار الشد المباشر نتيجة الصعوبة النسبية فى صب و فك عينة الإختبار ونظراً لوجود إجهادات ضغط مركزة بين كلابات

التثبيت وعينة الإختبار وكذلك إحتمال عدم مركزية حمل الشد فإنه يتم اللجوء إلى طرق غير مباشرة لقياس مقاومة الشد.

ثانيا: إختبار الشد غير المباشر (الطريقه البرازيليه) Indirect Tensile Strength

عينة الاختبار القياسية عبارة عن إسطوانة خرسانية قطرها ١٥سم وطولها ٣٠سم حيث توضع هذه الإسطوانة بين رأسى ماكينة الإختبار فى وضع أفقى وعلى جانبيها وتوضع بين شريحتين من الخشب الأبلكاج أوالمطاط بعرض ٢سم ويعين حمل الضغط المسبب لكسر العينة وعند إنهيارها يسجل الحمل الأقصى.



شكل اسطوانة الشد البرازيلي

$$\text{مقاومة الشد البرازيلي} = \frac{2P}{\pi DL} \quad \text{كج/سم}^2$$

حيث:

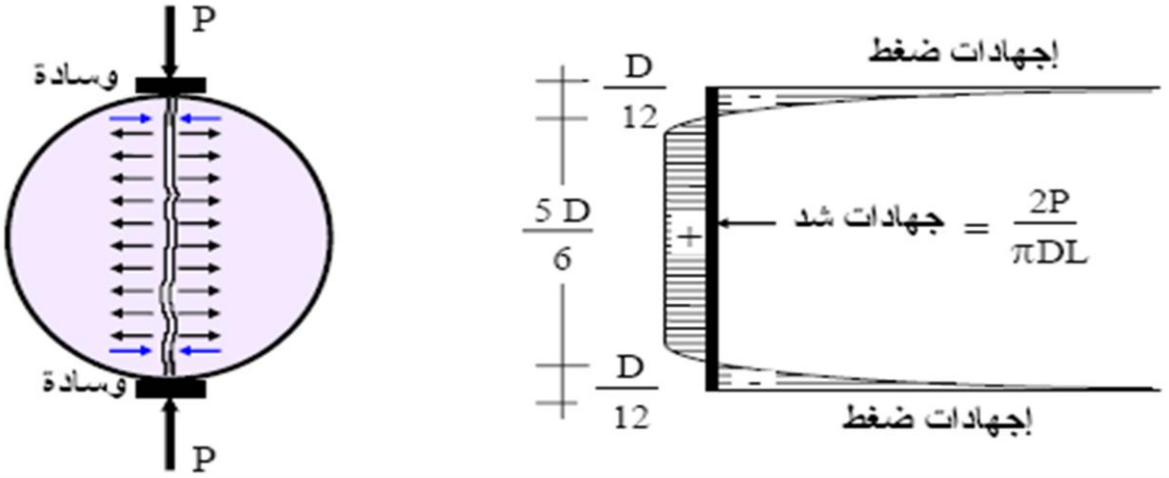
P = الحمل الأقصى ..... كج

D = قطر الإسطوانه ..... سم

L = طول الإسطوانه ..... سم

ويكون المستوى الرأسى للإنهيار هو مستوى إجهادات الشد الرئيسية حيث تكون موزعة على ٨٠% من طوله وفى نفس الوقت توجد إجهادات ضغط تتراوح قيمتها من ١٦ إلى ١٨مرة قدر إجهادات الشد وذلك فى المنطقتين تحت تأثير الحمل مباشرة (فى طرفى مستوى الإنهيار). ويتميز إختبار الشد غير المباشر بسهولة الإجراء وكذلك لوجود إجهادات الشد بقيمة ثابتة و

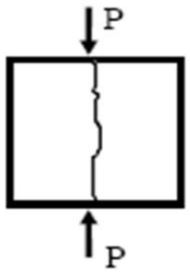
منتظمة على حوالى ٦٠ % من طول مستوى الإنهيار. وعموماً تؤخذ مقاومة الشد للخرسانة مساوية ل ٨٥ % من قيمة مقاومة الشد البرازيلى.



توزيع الإجهادات في عينة الشد البرازيلي

ويمكن إجراء الإختبارعلى عينات بشكل منشور أو مكعب أو جزء من كمرة وفى هذه الحالة يجب تصحيح قيمة المقاومة بضربها فى عامل ويعين معمليا.

مقاومة الشد البرازيلى $= k \frac{2P}{\pi DL}$ كج/سم^2 .



مختلفه

وعموماً فإن الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية قد أعطى بعض القيم الإسترشادية للعلاقة بين مقاومة الشد فى الأعمار المختلفة ومقاومة الشد بعد 28 يوم وذلك فى حالة الخرسانة المصنوعة فى الظروف العادية والغير محتوية على إضافات.

قيم إسترشاديه لنسبة مقاومة الشد في أعمار مختلفه

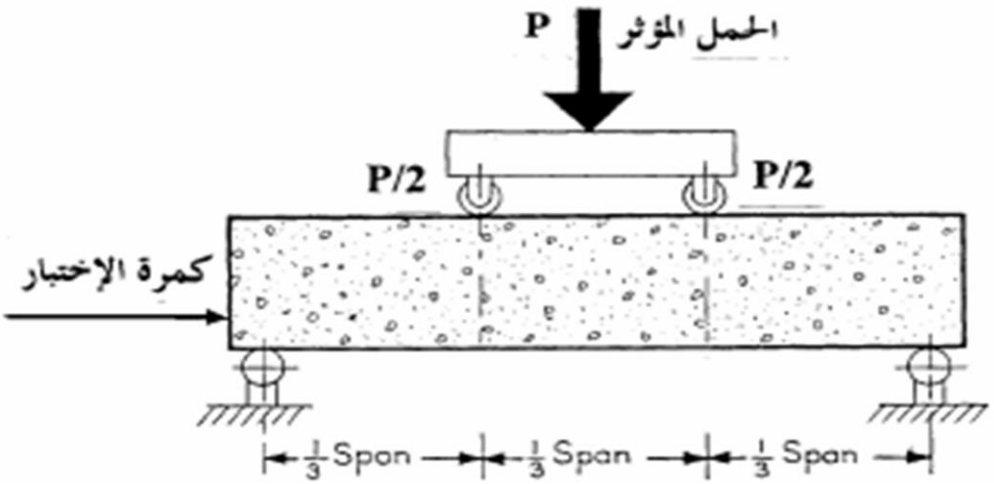
عمر الخرسانة (يوم)	٣	٧	٢٨	٩٠	٣٦٥
أسمنت بورتلاندى عادى	٠,٥	٠,٧١	١	١,٠٥	١,٠٥
أسمنت بورتلاندى سريع التصلد	٣/٢	٦/٥	١	١,٠٥	١,٠٥

3- مقاومة الإنحناء Bending Strength

عندما تتعرض كمرة خرسانية للإنحناء فإنه يمكن حساب مقاومة الإنحناء (التى تعتبر أيضاً مقياساً لمقاومة الشد غير المباشر) وتسمى معاير الكسر فى الإنحناء Modulus of Rupture وتتراوح قيم إجهادات معاير الكسر فى الإنحناء بين 12% - 20% من مقاومة الضغط. وبالتالى فإن مقاومة الإنحناء تزيد عن مقاومة الشد للخرسانة بنسبة من 60 الى 100%. وعموماً تؤخذ مقاومة الشد للخرسانة مساويا ل ٦٠% من قيمة مقاومة الإنحناء. ويجرى إختبارالإنحناء لتعيين مقاومة الخرسانة المتصلدة للإنحناء ودراسة سلوك الكمرات الخرسانية عند تعرضها لأحمال إنحناء وكذلك شكل الكسر الناتج عن إنهيار هذه الكمرات.

طريقة إجراء الاختبار:

- توضع الخرسانة فى قوالب على شكل كمرات أبعادها الداخلية 15*15*70سم أو 10*10*50سم وذلك للركام الذى لا يزيد مقاسه الإعتبارى الأكبر عن ٢٠مم. تخلط الخرسانة وتملأ القوالب وتدمك وتعالج بنفس الطريقة المتبعة فى الضغط ويعمل من نفس الخلطة الخرسانية عينات ضغط لإعطاء فكرة عن العلاقة بين الضغط والإنحناء.
- توضع الكمرة فى ماكينة الإختبار على ركيزتين ويراعى أن يكون كل من قضيب الإرتكاز والتحميل بطول أكبر من عرض الكمرة كما يكون التحميل تدريجيا وبمعدل منتظم يؤدى إلى الوصول بالقيمة النهائية للحمل فى مدة حوالى ٥ دقائق.



شكل الكمره في اختبار الإنحناء

ويفضل إجراء اختبار الانحناء للخرسانة بتحميل عينة الإختبار فى نقطتين Two-Point Loading لأن ذلك يجعل جزء الكمرة الذى يحدث بداخله الكسر معرض إلى عزم خالص Pure Bending دون تواجد قص فى ذلك الجزء الأمر الذى يجعل الكسر نتيجة مقاومة الإنحناء فقط وتعبر نتائج

الإختبار عن مدى تأثر الخرسانة بالإنحناء. ويمكن فى بعض الأحيان -عند الضرورة- عمل إختبار الإنحناء بالتحميل فى نقطة واحدة وهى منتصف الكمرة المختبرة ولايعطى ذلك الإختبار إنحناء خالص بل إنحناء مصحوب بتأثير القص ويكون معاير الكسر له أقل من معاير الكسر فى حالة التحميل فى نقطتين.

يدون حمل الكسر P_{max} وتحسب مقاومة الإنحناء (معاير الكسر) من المعادله:

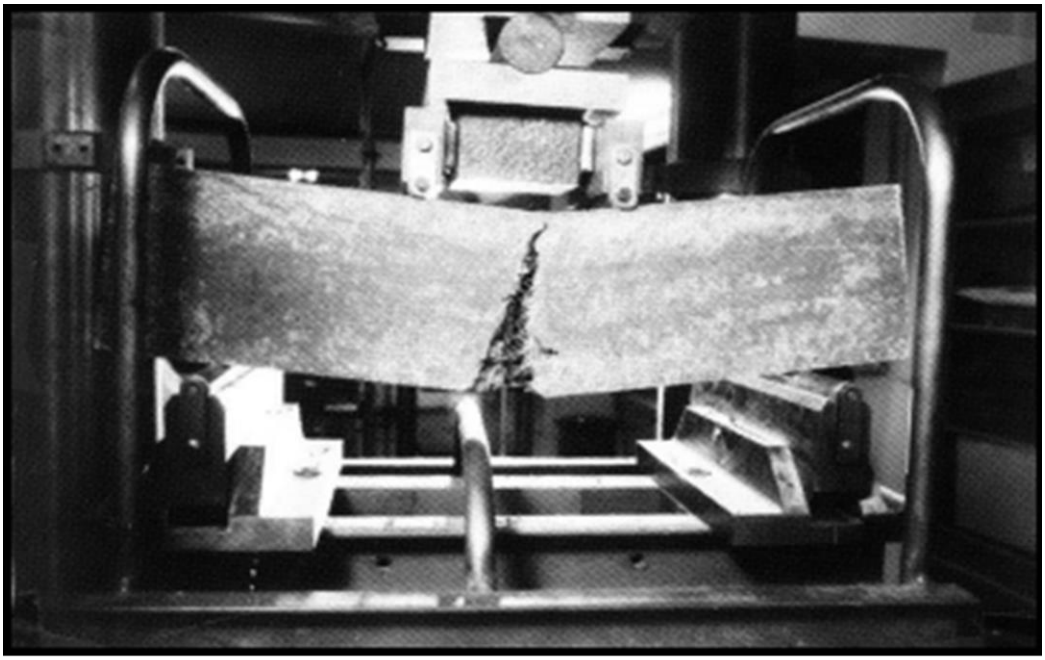
$$f_b = \frac{M_{max} \cdot Y}{I}$$

Where:

M_{max} = Maximum Bending Moment = **$(P_{max}L)/6$** (حالة حملين مركزيين)

$Y = h/2$

$I =$ Moment of Inertia = **$bh^3/12$**



شكل الكسر لكمره في اختبار الإنحناء