وزارة النقل
TRANSPORT MINISTRY

دلـــيل

تطبيق واستخدام تقنية الخرسانة عالية الأداء

في مشاريع وزارة النقل
بالمملكة العربية السعودية

رجب ١٤٣١ هـ
يوليو ٢٠١٠ م

وزارة النقل
TRANSPORT MINISTRY

جدول المحتويات
Table of Contents

البيان	رقم الصفحة
القسم الأول : مقدمة	
١–١ تمهيد	١٢
١–٢ خواص الخرسانة عالية الأداء	١٢
١–٣ درجة أداء الخرسانة عالية الأداء	١٢
القسم الثانى : مواصفات المواد المكونة للخرسانة عالية الأداء	
٢–١ الاسمنت	١٤
٢–٢ المواد الأسمنتية المكملة	١٤
٢–٣ الحصمة الخشنة	١٦
٢–٤ الحصمة الناعمة	١٧
٢–٥ الاضافات الكميائية	١٨
٢–٦ ماء الخلط	١٩
القسم الثالث : التصميم	
٣–١ خطوات تصميم الخلطات والعوامل المؤثرة فيها	٢٠
٣–٢ أمثلة لتصميم خلطات خرسانية عالية الأداء	٢٦
القسم الرابع : اختبارات الخرسانة عالية الاداء وضبط جودتها	
٤–١ اختبارات الخرسانة حديثة الخلط	٢٩
٤–٢ ضبط جودة الخرسانه عاليه الأداء	٢٩

القسم الأول: مقدمة

١-١ تمهيد :

تعتبر الخرسانة عالية الأداء والتي قد تكون مقاومة ضغطها ٦٥ ميجابسكال من الخرسانات القياسية التى تستخدم فى الخرسانة سابقة الصب أو الخرسانة سابقة الشد أو سابقة الاجهاد فى الجسور ، كما ان استخدام الخرسانة ذات رتبة عالية (٦٥ ميجابسكال) يوفر فى كميات الخرسانة المستخدمة بنسبة من ٢٥- ٤٠ ٪ بالمقارنة بالخرسانة ذات الرتب العادية (٣٠- ٤٠ ميجايسكال). كما يوفر فى وقت فك الشدات وزمن الإنشاء. وبالتالى فإن استخدام الخرسانة عالية الأداء يعتبر اقتصاديا نتيجة توفير فى المواد المستخدمة والتقليل من فترة الانشاء والتوفير فى مصاريف النقل والتركيب.

١-٢ خواص الخرسانة عالية الأداء

الخرسانة عالية الاداء هى خرسانة تم تطوير بعض خواصها لتناسب استخدامات معينة وظروف مناخية معينة حيث تتميز بالآتي :-

- سهولة صبها
- تدمك بدون انفصال حبيبى لمكوناتها
- لها مقاومة ضغط عالية فى الأعمار المبكرة
- لها خواص ميكانيكية عالية فى الأعمار المتأخرة
- لها نفاذية منخفضة
- لها ديمومة عالية
- لها صلابة عالية حيث تختزل طاقة عالية
- لها تغيرات حجمية صغيرة
- لها مقاومة برى عالية
- لها عمر طويل فى الظروف المناخية القاسية

١-٣ درجة أداء الخرسانة عالية الأداء

توجد ثمانية عوامل قادرة على تحديد درجة أداء الخرسانة كما هو موضح في الجدول رقم (١) :

- الديمومة مقاسة بدرجات التجمد والذوبان (معايير المرونة الديناميكى النسبى بعد ٣٠٠ دورة)

- مقاومة التقشر بعد ٥٠ دورة
- مقاومة البرى (متوسط سمك البرى بالمم)
- نفاذية املاح الكلوريدات (بالكولومبس)
- مقاومة الضغط (بالميجابسكال)
- معاير المرونة (بالجيجابسكال)
- الانكماش (بالميكروسترين)
- الزحف (بالميكروسترين)

أما بالنسبة للظروف المناخية في المملكة العربية السعودية فقد تم الاعتماد في تحديد درجة أداء الخرسانة عالية الأداء على ثلاث عوامل وهي (مقاومة البرى (متوسط سمك البرى بالمم)- نفاذية املاح الكلوريدات (بالكولومبس)- مقاومة الضغط (بالميجابسكال).

جدول رقم (١) الدرجات المختلفة لخواص الخرسانة الإنشائية عالية الأداء

الخاصية	طريقة الإختبار القياسية	درجة أداء الخرسانة عالية الأداء طبقا FHWA			
		١	٢	٣	٤
الديمومة مقاسة بدرجات التجمد والذوبان (معاير المرونة الديناميكى النسبى بعد ٣٠٠ دورة	AASHTO T 161 ASTM C 666 proc . A	60%-80%	≥ 80%		
مقاومة التقشر بعد ٥٠ دورة	ASTM C672	4,5	2,3	0,1	
مقاومة البرى (متوسط سمك البرى بالمم)	ASTM C944	2.0 – 1.0	0.5 – 1.0	0.5 ≥	
نفاذية املاح الكلوريدات (بالكولومبس)	AASHTO T277 ASTM C1202	2000 - 3000	800 – 2000	800 ≥	
مقاومة الضغط (بالميجابسكال)	AASHTO T22 ASTM C39	41- 55MPa	55- 69 MPa	69-97 MPa	97≤ MPa
معاير المرونة (بالجيجابسكال)	ASTM C469	24- 40 GPa	40- 50 GPa	50 GPa	
الانكماش (بالميكروسترين)	ASTM C157	800 – 600	600 – 400	400	

القسم الثانى : مواصفات المواد المكونة للخرسانة عالية الأداء

٢-١ الأسمنت

أولا : أنواع الاسمنت التي يمكن استخدامها في الخرسانة عالية الأداء :

هناك العديد من مصانع الأسمنت بالمملكة العربية السعودية ويمكن تقسيمها طبقا لتواجدها بالسوق كالآتي:

- المنطقة الغربية : أسمنت العربية ، وأسمنت تبوك ، وأسمنت ينبع ، وأسمنت المنطقة الجنوبية (مصنع أسمنت تهامة).
- المنطقة الشرقية : أسمنت المنطقة الشرقية، وشركة الأسمنت السعودية (مصنع الهفوف).
- المنطقة الوسطى : شركة أسمنت اليمامة السعودى - شركة أسمنت الرياض.

المنطقة الشمالية : شركة أسمنت القصيم.

المنطقة الجنوبية : أسمنت المنطقة الجنوبية (مصنع أسمنت تهامة).

ثانيا : مواصفات الاسمنت المستخدم في الخرسانة عالية الأداء :

١. يجب استخدام الأسمنت الذى له مقاومة ضغط لاتقل عن ٤٥ نيوتن/مم٢ عند عمر ٢٨ يوم.
٢. يجب أن يكون الأسمنت مطابقا لمتطلبات المواصفات القياسية السعودية رقم ١٤٣/١٩٧٩ للأسمنت البورتلاندى العادى (Ordinary Portland Cement)، والمواصفات القياسية السعودية رقم ٥٧٠/١٩٩٢ للأسمنت المقاوم للكبريتات(Astm-c-150).

٢-٢ المواد الأسمنتية المكملة

أولا : أنواع المواد الاسمنتية المكملة المستخدمة في الخرسانة عالية الأداء :

تعتبر المواد الأسمنتية المكملة أو الإضافية من المواد الهامة والتي تستخدم بكثرة في صناعة الخرسانة عالية الأداء لما لها من تأثير على أداء وديمومة الخرسانة كما أنها تستخدم أيضا في الحصول على مقاومة ضغط عالية للخرسانة ومن هذه المواد المستخدمة ما يلي:

١. غبار السيليكا (Silica Fume) .
٢. الغبار المتطاير (Fly Ash) .
٣. خبث الأفران (Blast Furnace Slag) .

ثانيا : مواصفات المواد الأسمنتية المكملة المستخدمة في الخرسانة عالية الأداء :

أ) غبار السيليكا (Silica Fume):

١. هى منتج ثانوى ينتج من مصانع السيليكون ذات نعومة عالية.
٢. يجب أن يطابق غبار السيليكا متطلبات مواصفات الجمعية الأمريكية ASTM C1240

كما هو موضح في الجدول رقم (٢).

٣. يجب أن لايقل محتوى ثانى أكسيد السيليكون عن ٨٥٪
٤. يجب أن لايزيد محتوى الرطوبة عن ٦٪
٥. يجب أن لايزيد الفاقد فى الحريق عن ٣٪
٦. يجب أن يزيد معاير التفاعل البوزولانى عن ٧٥٪.
٧. يجب أن لايزيد المحجوز على منخل ٤٥ ميكرون بالغسيل عن ٥٪
٨. المساحة السطحية لاتقل عن (١٥٠٠٠ سم٢/ جرام) .

الجدول رقم (٢) أهم خواص غبار السيليكا حسب مواصفات الجمعية الأمريكية ASTM C1240

حدود المواصفات الأمريكية ASTM C1240	
أكسيد السيليكا (SiO_2) – (٪)	لايقل عن ٨٥٪
الفاقد بالحريق (LOI) – (٪)	لايزيد عن ٦٪
المساحة السطحية (م٢ / جرام)	لايقل عن ١٥ (م٢/جرام)
محتوى الرطوبة (٪)	لايزيد عن ٣٪
المحجوز على منخل ٤٥ ميكرون بالغسيل	لايزيد عن ٥٪

ملاحظة :

يفضل استخدام غبار السيليكا في شرق المملكة العربية السعودية بهدف تعزيز مقاومة الخرسانة المسلحة للصدأ.

ب) الغبار المتطاير (Fly Ash):

١. هو منتج ثانوى (يعتبرنفاية) ينتج فى محطات الكهرباء التى تدار بالفحم الحجرى، وتختلف جودة الغبار المتطاير من محطة الى أخرى وحتى فى نفس المحطة.
٢. يجب أن يطابق الغبار المتطاير متطلبات مواصفات الجمعية الأمريكية ASTM C618.
٣. يجب أن يكون الفقد فى الحريق أقل من ٣٪
٤. يجب أن يكون محتوى أكسيد الكالسيوم أقل مايمكن ، (يفضل أن يكون أقل من ٥٪).

ج) خبث الأفران (Slag) :

١. هو منتج ثانوى أيضا ينتج فى مصانع الحديد والصلب فى الفرن العالى
٢. يضاف بنسبة ٢٥ ٪ الى ٧٠ ٪ من وزن الأسمنت
٣. يحسن مقاومة الخرسانة للكبريتات
٤. يجب أن يطابق خبث الأفران مواصفات الجمعية الأمريكية ASTM C 989.

٢-٣ الحصمة الخشنة

أولا : التوزيع الجغرافي للحصمة الخشنة بالمملكة :

هناك عدة مصادر للحصمة الخشنة (Coarse Aggregates) بالمملكة العربية السعودية من زلط طبيعى (Natural Gravel)، كسر الأحجار الجيرية (Crushed Limestone)، وكسر الأحجار النارية مثل كسر البازلت (Crushed Basalt) وكسر الجلوريت وكسر الجرانوديوريت. وفيما يلى بيان بتواجد الأنواع المختلفة من الحصمة الخشنة بالمناطق المختلفة بالمملكة.

- المنطقة الشمالية: الحصى الطبيعي، كسر الأحجار الجيرية (ناتج كسر صخور جيرية)، كسر البازلت (ناتج كسر صخور بازلتية).

المنطقة المركزية (الوسطى): كسر الأحجار الجيرية.

المنطقة الجنوبية : الزلط الطبيعي ، وكسر البازلت.

المنطقة الغربية : كسر البازلت و كسر الجلوريت (ناتج كسر صخور الجلوريت) وكسر الجرانوديوريت (ناتج كسر صخور الجرانوديوريت) ، والحصى الطبيعي.

المنطقة الشرقية: كسر الأحجار الجيرية.

ثانيا : مواصفات الحصمة الخشنة :

إن استخدام مقاس صغير من الحصمة الخشنة يعطى مقاومة ضغط أعلى ، ولكن يفضل استخدام أكبر مقاس ممكن من الحصمة والذى يحقق المقاومة المطلوبة ، لما له من تأثير كبير فى زيادة معاير المرونة وتقليل الإنكماش والزحف للخرسانة. وبالتالى يجب استخدام الحصمة الخشنة فى أعمال الخرسانة عالية الأداء التى تطابق متطلبات المواصفات العامة لإنشاء الطرق والجسور (نوفمبر ١٩٩٨) - القسم الخامس – البند ٥-٠١- ٢-٢-٢ والتى لها الخواص الآتية:

- المقاس الإعتبارى الأكبر (Maximum Nominal Size) لايزيد عن ١٩ مم.

أصالة كبريتات الصوديوم لاتزيد عن ١٠ ٪ حسب طريقة الإختبار رقم ٣١١ من اختبارات ادارة المواد والبحوث (MRDTM 311)

نسبة الفاقد فى البرى فى اختبار لوس انجلوس لاتزيد عن ٢٠ ٪ للحصمة ناتج تكسير الأحجار النارية و لاتزيد عن ٣٠ ٪ للحصمة ناتج تكسير الأحجار الجيرية حسب طريقة الإختبارر‌قم ٣٠٩ من اختبارات ادارة المواد والبحوث (MRDTM 309)

نسبة المبطط أو العصوى لاتزيد عن ١٠ ٪

نسبة الطين والجزيئات سهلة التفتت والطفلة لاتزيد عن ١ ٪ (MRDTM-312)(AASHTO-112)

النسبة المئوية للإمتصاص لاتزيد عن ٢ ٪ للحصمة ناتج تكسير الأحجار النارية و لاتزيد عن ٢،٥ ٪ للحصمة ناتج تكسير الأحجار الجيرية.

- محتوى الكلوريدات لايزيد عن ٠،٠٤ ٪ (MRDTM-319)

الوزن النوعى لايقل عن ٢،٥

يجب أن تكون الحصمة الخشنة خاملة وغيرقابلة للتفاعل مع قلويات الأسمنت طبقا للمواصفة ج-٢٨٩ المدعمة بالمواصفة ج-٢٢٧ من مواصفات الجمعية الأمريكية لإختبار المواد (ASTM).

يجب أن تكون الحصمة الخشنة مطابقة لمتطلبات التدرج حجم (ج) أو حجم (د) عند اخضاعها للإختبار رقم ٢٠٤ من اختبارات ادارة المواد والبحوث (MRDTM 204)

٢-٤ الحصمة الناعمة

أولا : التوزيع الجغرافى للحصمة الناعمة بالمملكة :

يمكن الحصول على الحصمة الناعمة (Fine Aggregates) من مصادر مختلفة بالمملكة حيث يوجد رمل طبيعى خشن (Natural Coarse Sand) بالمنطقة الغربية والمنطقة الجنوبية وفى بعض الأماكن بالمنطقة الشمالية ، وفى الحالات التى يوجد فيها رمل ناعم (رمل النفوذ – Dune Sand) فيتم خلطه مع الحصمة الناعمة ناتج تكسير الكسارات (crushed fine aggregates)، كما هو مستخدم فى المنطقة الشرقية والمنطقة الشمالية والمنطقة الوسطى.

ثانيا : مواصفات الحصمة الناعمة :

طبقا لجمعية الخرسانة الأمريكية (ACI 211.4R) فان الحصمة الناعمة التى لها معاير نعومة بين ٢,٥ & ٣,٢ يفضل استخدامها فى انتاج الخرسانة عالية المقاومة ، ومن نتائج الإختبارات أن الرمل الطبيعى الخشن له معاير نعومة بين ٢,٥ & ٣,٢ ، أما بالنسبة للرمل الناعم فيجب خلطة مع الحصمة الناعمة ناتج تكسير الكسارات ليعطى معاير نعومة بين ٢,٥ & ٣,٢

ويمكن تلخيص مواصفات الحصمة الناعمة التى تصلح لأعمال الخرسانة عالية الأداء فى الآتى:

معايير النعومة (fine Modulus) مابين ٢,٥ & ٣,٢

- نسبة الطين والطفلة (Silt and Clay Content)لاتزيد عن ١ ٪ (AASHTO-T112 (MRDTM-312

أصالة كبريتات الصوديوم لاتزيد عن ١٠ ٪ حسب طريقة الإختبارارقم ٣١١ من اختبارات ادارة المواد والبحوث (MRDTM- 311)

- محتوى الكلوريدات لايزيد عن ٠,٠٥ ٪ (MRDTM- 319)

يجب أن تكون الحصمة الناعمة خاملة وغيرقابلة للتفاعل مع قلويات الأسمنت طبقا للمواصفة ج-٢٨٩ المدعمة بالمواصفة ج-٢٢٧ من مواصفات الجمعية الأمريكية لإختبار المواد (ASTM).

يجب أن تكون الحصمة الناعمة مطابقة لمتطلبات التدرج الموضحة بالجدول رقم (٣) عند اخضاعها للإختبار رقم ٢٠٤ من اختبارات إدارة المواد (MRDTM 204).

جدول رقم (٣) حدود التدرج الحبيبى للركام الصغير

فتحة المنخل	(⅜) ٩,٥ مم	(رقم٤) ٤,٧٥مم	(رقم١٦) ١,١٨مم	(رقم٥٠) ٠,٣٠ مم	(رقم١٠٠) ٠,١٥ مم	(رقم٢٠٠) ٠,٠٧٥ مم
٪ المار	١٠٠	١٠٠ - ٩٥	٨٠ -٤٥	٣٠ - ١٠	١٠ - ٢	٣ - ٠

٢-٥ الإضافات الكيميائية (Admixtures)

أولا : تعريف الاضافات الكيميائية :

تعرف اضافات الخرسانة بأنها المواد الأخرى خلاف الحصمة والماء والأسمنت والتى تضاف للخرسانة لتحسين خواصها فى الحالة الطازجة أو المتصلدة ، وتضاف للأسباب الآتية:

١. تحسين الصب وسهولة التشطيب
٢. تحسين التشغيلية
٣. زيادة مقاومة الضغط
٤. تحسين المظهر العام
٥. تسريع فك الشدات
٦. تحسين عملية ضخ الخرسانة فى المضخات

ثانيا : أنواع الاضافات

١. اضافات تقليل ماء الخلط
٢. الملدنات (Plasticizers)
٣. الملدنات عالية الأداء (Super-plasticizers)
٤. اضافات مؤخرات زمن الشك
٥. اضافات ادخال الهواء المحبوس
٦. اضافات معجلات زمن الشك

ثالثا : مواصفات الاضافات الكيميائية

١. يجب أن تحقق هذه الإضافات مواصفات الجمعية الأمريكية لإختبار المواد(ASTM C494) للنوع (F) أو النوع (G) . أو تفى بمتطلبات النوع (و) أو النوع (ز) من المواصفة م-١٩٤ من مواصفات الإتحاد الأمريكى للعاملين بالطرق والنقل (AASHTO M194).
٢. يفضل استخدام مثل هذه الإضافات بنسبة تتراوح مابين ١٪ & ٢٪ من وزن الأسمنت، أو بنسبة بنسبة تتراوح مابين ١ لتر & ٢ لتر لكل ١٠٠ كجم من الأسمنت ، وبحد أقصى ٣٪ من وزن الأسمنت أو حسب النشرات الفنية للصانع.

رابعا : بعض الحقائق عن الاضافات الكيميائية

١. الملدنات أو أى نوع من أنواع الاضافات الأخرى ليست مصممة للخلطات المصممة تصميما سيئا.
٢. ينبغى أن تستخدم عندما يكون هناك سببا أو داعى لاستخدامها

٢-٦ ماء الخلط

يجب أن يطابق ماء الخلط المواصفات العامة لإنشاء الطرق والجسور – وزارة النقل (نوفمبر ١٩٩٨) – القسم الخامس – البند ٥-٠١- ٢-٣. ويجب أن لايحتوى الماء على الكلوريدات بنسبة أعلى من ٥٠٠ جزء فى المليون ، ومحتوى الكبريتات يجب أن لاتزيد عن ١٠٠٠ جزء فى المليون اذا أختبر طبقا للطريقة ٥١٤ من طرق اختبار ادارة المواد والبحوث (MRDTM 514). ويجب أن لاتؤثر الأملاح بالماء على مقاومة الضغط للخرسانة تأثيرا سالبا.

القسم الثالث: التصميم

٣-١ خطوات تصميم الخلطات والعوامل المؤثرة فيها

يمكن تلخيص خطوات اختيار نسب الخلط للخرسانة عالية الأداء فى الآتى:

الخطوة الأولى : اختيار التشغيلية ومقاومة الضغط

من أهم خواص الخرسانة عالية الأداء أن لها تشغيلية عالية ، وغالبا ماتكون الخرسانة انسيابية ولذلك يفضل قياس قطر انسياب الخرسانة والذى يسمى (Slump Flow)بدلا من قياس الهابط للخرسانة (Slump) ويجب أن لايقل قطر الإنسياب عن ٥٠٠مم. أما بالنسبة لحساب مقاومة الضغط التصميمية فتستخدم المعادلة رقم (١) فى حسابها كالآتى:

$F_{cr} = 0.9\,F_c + 2.33\,S$	(١)

حيث :

(Fcr) : مقاومة الضغط التصميمية للخرسانة

(Fc) : مقاومة الضغط المميزة للخرسانة

(S) : معامل الانحراف (Standard Division)

وفى حالة عدم توافر البيانات لمعامل الحيود من خلطات خرسانية سابقة فيمكن استخدام المعادلة رقم (٢) فى حساب مقاومة الضغط التصميمية.

مقاومة الضغط التصميمية للخرسانة = مقاومة الضغط المميزة للخرسانة + ١٠ ميجابسكال	(٢)

من المعلوم أن الخرسانة عند عمر ٥٦ يوم و٩٠ يوم تعطى مقاومة ضغط أعلى من تلك عند عمر ٢٨ يوم ، وهذا ملحوظ جدا فى الخرسانات المحتوية على الغبار المتطاير وخبث الأفران ، وغير ملحوظ بقوة فى الخرسانة المحتوية على غبار السليكا، وبالتالى يجب استخدام الأعمار المتأخرة فى الإختبارات للحصول على خلطات اقتصادية حيث أن محتوى المواد الأسمنتية تختار بناء على مقاومة الضغط المطلوبة عند عمر الإختبار المطلوب.

الخطوة الثانية : اختيار مقاس الحصمة الخشنة

كما ينص الكود الأمريكى (ACI 318) على أن أقصى مقاس للحصمة الخشنة يجب أن لايزيد عن خمس أصغر مسافة بين الفرم (الشدة) ولايزيد عن ثلث سمك البلاطة أو

ثلاثة أرباع المسافة بين حديد التسليح. وكما سبق ذكره فإن مقاومة الضغط العالية تتوقف على حجم الحصمة الخشنة المستخدمة وبصفة عامة فيمكن اختيار حجم الحصمة الخشنة كالآتى:

- الخرسانة التى لها مقاومة ضغط أقل من ٦٢ ميجابسكال يستخدم مقاس من ٢٥ – ١٩ مم
- الخرسانة التى لها مقاومة ضغط أكبر من ٦٢ ميجابسكال يستخدم مقاس من ١٩ – ١٢,٥ مم

الخطوة الثالثة : اختيار محتوى الحصمة الخشنة

يبين الجدول رقم (٤) حجم الحصمة الخشنة الموصى به كنسبة من حجم الخرسانة وكدالة فى مقاس الحصمة الخشنة المستخدمة ، وذلك فى حالة استخدام الحصمة الناعمة ذات معاير نعومة ٢,٥ – ٣,٢

جدول رقم (٤) حجم الحصمة الخشنة الموصى به للمقاسات المختلفة (ACI211.4R)

المقاس الإعتبارى الأكبر (مم)	٢٥ مم	١٩ مم	١٢,٥ مم	٩,٥ مم
حجم الحصمة الخشنة الجاف كنسبة من حجم الخرسانة	٠,٧٥	٠,٧٢	٠,٦٨	٠,٦٥

بعد تحديد حجم الحصمة الخشنة القياسى يمكن حساب وزن الحصمة الخشنة فى الخلطة من المعادلة الآتية:

وزن الحصمة الخشنة = حجم الحصمة الخشنة القياسى من جدول رقم (٤) X كثافة الحصمة الجاف	(٣)

الخطوة الرابعة : حساب محتوى ماء الخلط ونسبة الهواء بالخلطة

يتوقف محتوى ماء الخلط على درجة التشغيلية المطلوبة و حجم وشكل الحصمة الخشنة وتدرجه. كما يتوقف على كمية الأسمنت ومحتوى ونوع الإضافة المستخدمة. والجدول رقم (٥) يعطى محتوى الماء التقديرى والذى يجب التأكد منه عن طريق اجراء خلطات تجريبية.

جدول رقم (٥) محتوى المياه التقديرى ونسبة الهواء فى الخلطات بإعتبار نسبة الفراغات ٣٥٪ فى الحصمة الناعمة

الهابط (مم)	مقاس الحصمة الخشنة (مم)			
	٢٥	١٩	١٢,٥	٩,٥
٢٥ – ٥٠ مم	١٦٦	١٦٩	١٧٥	١٨٤
٥٠ – ٧٥ مم	١٧٢	١٧٥	١٨٤	١٩٠
٧٥ – ١٠٠ مم	١٧٨	١٨١	١٩٠	١٩٦
خرسانة انسيابية	١٨٤	١٨٧	١٩٦	٢٠٢
الهواء المحبوس	١,٥٪	٢٪	٢,٥٪	٣٪

ويجب أن يلاحظ أن محتوى الماء يتم تحديده بإعتبار أن نسبة الفراغات بالحصمة الناعمة حوالى ٣٥٪ ، ويمكن حساب نسبة الفراغات فى الحصمة الناعمة من المعادلة الآتية:

نسبة الفراغات فى الحصمة الناعمة (٪) = ١ – (كثافة الحصمة الجاف / الوزن النوعى) X ١٠٠	(٤)

وفى حالة اختلاف نسبة الفراغات فى الحصمة الناعمة عن ٣٥٪ يتم تصحيح محتوى ماء الخلط من المعادلة الآتية:

التعديل فى محتوى الماء = محتوى الماء من الجدول رقم (٥) X (نسبة الفراغات في الحصمه الناعمة / ٣٥)	(٥)

ويجب أن يلاحظ أن محتوى الماء بالخلطات والموضح بالجدول رقم (٥) يمكن تخفيضها بنسبة تتراوح مابين ٣٠٪ فى حالة استخدام اضافات الخرسانة عالية الأداء (Superplasticizers) من النوع F & G

الخطوة الخامسة : اختيار نسبة الماء / للمواد الأسمنتية

تتوقف مقاومة الضغط على نسبة الماء للأسمنت (W/C) أو نسبة الماء / للمواد الأسمنتية (W/C+P) ، كما تتوقف ديمومة الخرسانة على نسبة الماء للأسمنت ، وكلما قلت نسبة الماء للأسمنت زادت ديمومة الخرسانة. ويمكن الإستعانة بالقيم الموضحة بالجدول رقم (٦)

لإختيار نسبة الماء للمواد الأسمنتية طبقا لمقاومة الضغط عند عمر ٢٨ يوماً أو ٥٦ يوماً وطبقا لمقاس الحصمة االخشنة المستخدم.

الجدول رقم (٦) نسبة الماء للمواد الأسمنتية القصوى والموصى بها فى حالة استخدام اضافات الخرسانة عالية الأداء

مقاومة الضغط التصميمية (ميجابسكال)		نسبة الماء / للمواد الأسمنتية (W/C+p)			
		مقاس الحصمة الخشنة			
		٢٥ مم	١٩ مم	١٢,٥ مم	٩,٥ مم
٤٨	عمر ٢٨ يوم	٠,٤٣	٠,٤٥	٠,٤٨	٠,٥٠
	عمر ٥٦ يوم	٠,٤٦	٠,٤٨	٠,٥٢	٠,٥٥
٥٥	عمر ٢٨ يوم	٠,٣٨	٠,٤٠	٠,٤٢	٠,٤٤
	عمر ٥٦ يوم	٠,٤٠	٠,٤٢	٠,٤٥	٠,٤٨
٦٢	عمر ٢٨ يوم	٠,٣٤	٠,٣٥	٠,٣٦	٠,٣٨
	عمر ٥٦ يوم	٠,٣٦	٠,٣٧	٠,٣٩	٠,٤٢
٦٩	عمر ٢٨ يوم	٠,٣٠	٠,٣١	٠,٣٢	٠,٣٣
	عمر ٥٦ يوم	٠,٣٢	٠,٣٣	٠,٣٥	٠,٣٧
٧٦	عمر ٢٨ يوم	٠,٢٧	٠,٢٧	٠,٢٩	٠,٣٠
	عمر ٥٦ يوم	٠,٢٩	٠,٢٩	٠,٣١	٠,٣٣
٨٣	عمر ٢٨ يوم	٠,٢٥	٠,٢٥	٠,٢٦	٠,٢٧
	عمر ٥٦ يوم	٠,٢٦	٠,٢٧	٠,٢٨	٠,٣٠

الخطوة السادسة : حساب محتوى المواد الأسمنتية

يمكن حساب وزن المواد الأسمنتية المطلوبة للخلطة عن طريق قسمة محتوى الماء (الذى تم حسابه فى الخطوة رقم ٤) على نسبة الماء / للمواد الأسمنتية ($W/C+P$) والتى تم تحديدها فى الخطوة رقم (٥).

محتوى المواد الأسمنتية = محتوى الماء / (نسبة الماء للأسمنت)	(٦)

الخطوة السابعة : حساب نسب الخلط

فى حالة استخدام الأسمنت فقط وبدون مواد أسمنتية مكملة فإن وزن الأسمنت يساوى محتوى المواد الأسمنتية المحسوب من المعادلة (٦) فى الخطوة السادسة. وباستخدام طريقة الحجم المطلق يمكن حساب محتوى الرمل أو الحصمة الناعمة فى المتر المكعب من المعادلة رقم (٧) حيث سبق حساب محتوى الحصمة الخشنة من الخطوة (٣) ، ومحتوى الماء ونسبة الهواء المحبوس من الخطوة (٤).

$C/\gamma c + W/\gamma w + G/\gamma g + S/\gamma s + \%\text{air content} \times 1000 = 1000\ L$	(٧)

الخطوة الثامنة : حساب نسب الخلط فى وجود المواد الأسمنتية المكملة

فى حالة استخدام الغبار المتطاير (Flay Ash) كمادة أسمنتية فإن نسب استخدامة تتراوح مابين ١٥٪ و ٣٥٪ من وزن الأسمنت حسب نوع الغبار المتطاير ، فى حين أن غبار السيليكا (Silica Fume) يستخدم بنسبة تتراوح مابين ٥٪ & ١٥٪ والنسبة السائدة هى ١٠٪ من وزن الأسمنت ، أما بالنسبة لخبث الأفران (Blast Furnace Slag) فيستخدم بنسبة من ٣٠٪ حتى ٧٠٪ من وزن الأسمنت.

وعندما تحدد نسبة المواد الأسمنتية المكملة فإنه يمكن حساب الوزن المستخدم من كل منها والذى يساوى محتوى المواد الأسمنتية المحسوب من المعادلة (٦) فى الخطوة السادسة مضروبا فى نسبة استخدامها (١٠٪ فى غبار السيليكا ، أو حوالى ٣٠٪ فى الغبار المتطاير). وبمعرفة كثافة غبار السيليكا و كثافة الغبار المتطاير يمكن حساب حجم هذه المواد ، وبالتالى يتم حساب وزن الحصمة الناعمة من المعادلة رقم (٧) بعد اضافة الجزء الخاص بالمواد الأسمنتية المكملة فى هذه المعادلة وهو ($P/\gamma p$) .

الخطوة التاسعة : الخلطات التجريبية

من الخطوات (١) حتى (٨) يتم تحديد كميات المواد المكونة للخلطة وتجرى الخلطات التجريبية لقياس التشغيلية والمقاومة. ومن الخلطات التجريبية يتم تعديل نسب الرمل والركام الكبير ومحتوى الماء طبقا لمحتوى الرطوبة فى الركام المستخدم. وتكون الخلطات التجريبية ناجحة اذا كان الخليط الناتج بعد الخلط متجانس وبالحجم الكاف لصب العدد المكافىء من عينات قياس المقاومة.

الخطوة العاشرة : تعديل وضبط نسب الخلط

إذا لم تتحقق الخواص المطلوبة للخرسانة ، فإنه يجب تعديل وضبط نسب الخلط طبقا للخطوات الآتية لإعطاء التشغيلية المطلوبة:

١. الهابط الإبتدائى : أذا كان الهابط للخلطة التجريبية ليس فى الحدود المطلوبة فإن محتوى الماء يجب تعديله ومحتوى المواد الأسمنتية أيضا تعدل للحفاظ على نسبة الماء للمواد الأسمنتية طبقا للتصميم. وبالتالى فإن محتوى الرمل يجب تعديله ليعطى التشغيلية المطلوبة.

٢. محتوى اضافات الخرسانة : يجب تعديل وضبط محتوى الإضافات لتناسب الخلطات التجريبية بالمعمل وكذلك بالحقل. ويسمح باعادة استخدام الإضافات بالموقع عند الحاجة بحيث يكون محتوى الإضافات فى الحدود التى يحددها المصنع لتلك المواد.

٣. محتوى الحصمة الخشنة : طبقا لحالة الصب للعناصر المختلفة يمكن تقليل محتوى الحصمة الخشنة وزيادة محتوى الحصمة الناعمة (الرمل) اذا ظهر أن الخلطة خشنة نسبيا وذلك بما يتناسب مع ظروف الموقع.

الخطوة الحادية عشر : اختيار نسب الخلط المثلى

بمجرد عمل الخلطات التجريبية واجراء التعديلات والضبط فى نسب الخلط لتحقق التشغيلية والمقاومة المطلوبة ، يجب اعداد عينات مقاومة الضغط سواء المكعبات أو الإسطوانات تحت ظروف الموقع ، ومن النتائج يتم اختيار نسب الخلط المثلى.

٣-٢ أمثلة لتصميم خلطات خرسانية عالية الأداء

(أ) مثال بدون استخدام مواد أسمنتية مكملة

إذا أريد تصميم خلطة خرسانية عالية الأداء للإستخدام فى أحد الكبارى فى المنطقة الوسطى لتعطى مقاومة ضغط ٦٠ ميجابسكال بعد ٢٨ يوم ، وباستخدام المواد المتاحة الآتية:

أسمنت بورتلاندى عادى من شركة الأسمنت السعودية (مصنع الهفوف).

- الحصمة الناعمة : تتكون من رمل طبيعى ناعم (dune sand) ورمل خشن ناتج تكسير كسارات(crushed sand) وبنسبة خلط ٣٣٪ : ٦٧٪ ليعطي حصمة ناعمة لها معاير نعومة = ٢,٧ ، و الوزن النوعى لها = ٢,٥٧ ، و نسبة الإمتصاص = ١,٦٧٪.
- الحصمة الخشنة: كسر الحجر الجيرى له مقاس = ١٢,٥ مم ، ووزن نوعى = ٢,٥٥ ، ونسبة الإمتصاص = ١,٩٣٪ ، والكثافة الجافة = ١٥٤٩ كجم/م٣.

الخطوة الأولى : اختيار الهابط ومقاومة الضغط :

يتم اختيار الهابط للخرسانة ليعطى خرسانة انسيابية وذلك باستخدام أحد الإضافات عالية الأداء (Superplasticizer) بنسبة ٢٪ من وزن الأسمنت. ونظرا لعدم وجود بيانات عن معامل الحيود للخلطات عالية المقاومة فإن الإجهاد التصميمى للخرسانة عالية الأداء = ٦٠ + ١٠ = ٧٠ ميجابسكال.

الخطوة الثانية : اختيار مقاس الحصمة الخشنة :

بالنسبة للخرسانة التى لها مقاومة ضغط ٧٠ ميجابسكال فيفضل استخدام الحصمة الخشنة ذات المقاس الإعتبارى ١٢,٥ مم.

الخطوة الثالثة : اختيار محتوى الحصمة الخشنة :

من الجدول رقم (٤) حجم الحصمة الخشنة الموصى به كنسبة من حجم الخرسانة = ٠,٦٨ من حجم الخرسانة.

وزن الحصمة الخشنة = ١٥٤٩ X ٠,٦٨ = ١٠٥٣ كجم.

الخطوة الرابعة : حساب محتوى ماء الخلط ونسبة الهواء بالخلطة :

من الجدول رقم (٥) فإن محتوى الماء التقديرى عند الهابط (٥٠ مم) ومقاس الحصمة الخشنة (١٢,٥ مم) = ١٩٦ لتر ، ونسبة الهواء المحبوس = ٢,٥٪.

الخطوة الخامسة : اختيار نسبة الماء / للمواد الأسمنتية :

نسبة الماء / للمواد الأسمنتية (W/C+P) من الجدول رقم (٦) عند مقاومة ٧٠ ميجابسكال وعمر ٢٨ يوم هى ٠,٣٢

الخطوة السادسة : حساب محتوى المواد الأسمنتية :

عند استخدام اضافات عالية الأداء بنسبة ٢٪ من وزن الأسمنت فيجب تخفيض محتوى الماء بنسبة تصل الى ٢٠٪ ،

أى أن محتوى الماء = ١٩٦ X ٨٠٪ = ١٥٧ لتر

محتوى المواد الأسمنتية = ١٥٧ / ٠,٣٢ = ٤٩٠ كجم/ م٣

الخطوة السابعة : حساب نسب الخلط :

باستخدام طريقة الحجم المطلق يمكن حساب محتوى الرمل أو الحصمة الناعمة فى المتر المكعب من المعادلة التالية:

$$C/\gamma c + W/\gamma w + G/\gamma g + S/\gamma s + \%\ \text{air content} \times 1000 = 1000\ L$$

$$490/3.15 + 157/1 + 1053/2.55 + S/2.57 + 0.025 \times 1000 = 1000$$

$$155.6 + 157 + 413 + 0.389\ S + 25 = 1000$$

$$0.389\ S = 1000 - 750 = 250$$

$$S = 250/0.389 = 643\ kg$$

وزن الحصمة الناعمة (الرمل) = ٦٤٣ كجم/ م٣

وأثناء اجراء الخلطات التجريبية يتم حساب محتوى الرطوبة بالرمل وكسر الحجر الجيرى وتعدل القيم المذكورة عاليه بزيادة أو تقليل محتوى الماء والركام الصغير. وأيضا استخدام الإضافات عالية الأداء ربما يقلل من محتوى الماء وبالتالى تجرى عمليات ضبط نسب الخلط تباعا ، وتسجل نسب الخلط كما هو مبين بالجدول رقم (٧) فى حالة استخدام أسمنت بورتلاندى عادى فقط كمادة رابطة.

جدول رقم (٧) مكونات الخلطة بالكجم لتعطى واحد متر مكعب من الخرسانية عالية الأداء

الأسمنت (كجم)	الغبار المتطاير	غبار السيليكا	خبث الأفران	الحصمة الناعمة (كجم)	الحصمة الخشنة (كجم)	ماء الخلط (لتر)	اضافات الخرسانة (لتر)
٤٩٠	---	---	---	٦٤٣	١٠٥٣	١٥٧	٩،٨

وبعد اجراء الخلطات التجريبية إذا ظهر أن الخلطة خشنة فيمكن زيادة وزن الرمل، وبالتالى يعدل وزن الحصمة الخشنة.

(ب) مثال لتصميم خلطة بها غبار السيليكا

فى المثال السابق إذا أريد استخدام غبار السيليكا بنسبة ١٠٪ من وزن الأسمنت أى حوالى ٤٩ كجم/ م٣

فإن محتوى الأسمنت = ٤٩٠ – ٤٩ = ٤٤١ كجم/ م٣

مع الحفاظ على كل من محتوى الماء = ١٥٧ كجم/ م٣

محتوى الحصمة الخشنة = ١٠٥٣ كجم/ م٣

فيمكن حساب محتوى الحصمة الناعمة من المعادلة التالية

$$441 / 3.15 + 49 / 2.5 + 157 / 1 + 1053 / 2.55 + S / 2.57 + 0.025 \times 1000 = 1000$$

$$140 + 19.6 + 157 + 413 + 0.389\ S + 25 = 1000$$

$$S = 245.4 / 0.389 = 630\ kg$$

وزن الحصمة الناعمة (الرمل) = ٦٣٠ كجم/ م٣

ويجب أن يلاحظ أن فى حالة استخدام غبار السيليكا فيجب استخدام نسبة أعلى من اضافات الخرسانة نتيجة النعومة العالية لغبار السيليكا وقد تصل نسبة الإضافة الى ٢،٥٪ من وزن المواد الأسمنتية وبين الجدول (٨) نسب الخلط .

جدول رقم (٨) مكونات الخلطة بالكجم لتعطى واحد متر مكعب من الخرسانية عالية الأداء

الأسمنت (كجم)	الغبار المتطاير	غبار السيليكا	خبث الأفران	الحصمة الناعمة (كجم)	الحصمة الخشنة (كجم)	ماء الخلط (لتر)	اضافات الخرسانة (لتر)
٤٤١	---	٤٩	---	٦٣٠	١٠٥٣	١٥٧	١٢،٣

القسم الرابع :اختبارات الخرسانة عالية الأداء وضبط جودتها

٤-١ اختبارات الخرسانة عالية الأداء

٤-١-١ اختبارات الخرسانة حديثة الخلط

استخدمت الاختبارات الآتية لقياس تشغيلية الخرسانة عالية الأداء:

١. اختبار الهابط (Slump test)
٢. اختبار الانسياب (Slump Flow test)

حيث يتم قياس تشغيلية الخلطة الخرسانية الطازجة بالانسياب (مم) و التي يجب أن لا تقل عن ٥٠٠ مم

٤-١-٢ اختبارات الديمومة والأداء

يوضح الجدول رقم (٩) ملخص للإختبارات التى يجب أن يتم اجراؤها لتحديد أداء الخرسانة المتصلدة لتناسب ظروف المملكة العربية السعودية.

جدول رقم (٩) الاختبارات المطلوبة لتحديد درجات أداء الخرسانة عالية الأداء

الخاصية	طريقة الاختبار القياسية	الملاحظات
مقاومة البرى	ASTM C944	يقاس عمق البرى طبقا لطريقة الاختبار B الموضحة فى ASTM C 799
نفاذية املاح الكلوريدات	AASHTO T277 ASTM C1202	يجرى الاختبار طبقا للطريقة القياسية الموضحة
مقاومة الضغط	AASHTO T22 ASTM C39	أجرى الاختبار على الخرسانة عند عمر ٧ & ٢٨ يوم

٤-٢ ضبط جودة الخرسانة عالية الأداء

يجب على المقاول أن يقوم بالتأكد من ضبط جودة أعمال الخرسانة عالية الأداء باجراء الاختبارات المشار اليها في الفقرة ٣-٢-١ و الفقرة ٣-٢-٢ حسب المعدلات الموضحة في الجدول

رقم (١٠) ومقارنتها بالمواصفات المطلوب تحقيقها لكل درجة أداء مطلوب تحقيقها حسب الجدول رقم(١١)

جدول رقم (١٠) معدلات اجراء الاختبارات لضبط جودة الخرسانة عالية الاداء

الخاصية	معدل اجراء الاختبار
اختبار الانسياب (Slump Flow test)	مرة كل شحنة خرسانة
مقاومة البرى	عند بداية المشروع ، مرة كل شهر
نفاذية املاح الكلوريدات	عند بداية المشروع ، مرة كل شهر
مقاومة الضغط عند عمر (٧ ، ٢٨)	مرة كل ١٠٠ م٣

جدول رقم (١١) الدرجات المختلفة لخواص الخرسانة عالية الأداء

الخاصية	طريقة الإختبار القياسية	درجة أداء الخرسانة عالية الأداء طبقا FHWA			
		١	٢	٣	٤
مقاومة البرى (متوسط سمك البرى بالمم)	ASTM C944	1.0 – 2.0	0.5 – 1.0	0.5 ≥	
نفاذية املاح الكلوريدات (بالكولومبس)	AASHTO T277 ASTM C1202	2000– 3000	800 – 2000	800 ≥	
مقاومة الضغط بعد ٢٨ يوم (بالميجابسكال)	AASHTO T22 ASTM C39	41 –55MPa	55–69MPa	69–97MPa	97≤ MPa