تصميم الخلطات الخرسانية
Concrete Mix Design

١ - المقدمة

تصميم الخلطات الخرسانية يعنى تحديد القيم النسبية لمكوناتها Proportioning بما يتفق مع المتطلبات المطلوبة لعمل معين. ويكون ذلك باستخدام نسب ثبُتت فاعليتها من الخبرة وتسمى بالنسبة الوضعية Empirical Proportioning وقد يكون بطرق حسابية مبنية على أساس فنى تتضمن خواص المواد المستخدمة والخواص المطلوبة فى الخرسانة المتصلدة (مثل مدى المقاومتها للأحمال أو المقاومة ألبرى) بالضافة لمتطلبات صناعة الخرسانة مثل السهولة المناسبةللمناولة او الصب Placing والتسوية النهائية (الانهاء Finishing) لسطح الخرسانة. وذلك مع مراعاة التكاليف الإقتصادية حسب نوع العمل الإنشائى المطلوب. وهذه الطرق الحسابية تهدف الى إستخدام المواد الموجودة Available Materials لنحصل منها على خرسانة ذات خواص مطلوبة فى الحالتين الرطبة اوالطازجة والمتصلدة وذلك بأقل التكاليف Required Qualities at Minimum Cost ويمكن إعتبار أن مقاومة الخرسانة للضغط تبين مدى جودة Quality الخرسانة المتصلدة كما تعبر قيمة الهبوط Slump عن مدى جودة الخرسانة الطازجة.

ويعتبر تحديد نسب الخلطة الخرسانية من أهم العوامل التى تؤثر على جودة الخرسانة وعلى إقتصاديات المشروع. فمن الممكن الحصول على خرسانات متباينة فى جودتها وثمنها بالرغم أن جميعها تتكون من نفس المواد. ويعتمد الإقتصاد النسبى للخلطات الخرسانية على أثمان مكوناتها وعلى أجور العمال وتكاليف النقل لتلك المكونات. ويعتبر الأسمنت أحد المكونات الأساسية للخرسانة والذى تؤثر نسبة وجوده فى الخلطة تأثيراً كبيراً على تكاليفها نظراً لغلو ثمنه بالنسبة لباقى المكونات.

٢ - كيفية بيان نسب مكونات الخرسانةExpressing Propoetions

❐تُبَيَن مكونات الخرسانة من المواد الحبيبيةGranular Materials وهي الأسمنت والركام الناعم او الصغير والركام الخشن او الكبير على هيئة نسب Ratios وزنية او حجمية فمثلا عندما يقال خلطة ١ : ٢ : ٤ معناها:

الأسمنت	الرمل	الحصى
١	٢	٤

أى تحتوى على جزء من الأسمنت وجزئين من الركام الناعم وأربعة أجزاء من الركام الخشن. وتفضل أن تكون تلك النسب بالوزن لعدم إمكان التحديد الدقيق لكمية الأسمنت بالحجم وأيضا الركام نتيجة تغير الكمية التى يستوعبها حجم معين بتغيير مدى الدمك Compaction المستخدم. كما أن الركام الناعم قد يتغيرحجمه بأثير ظاهرة زيادة الحجم Bulking بالرطوبة.

- وقد تُبَيَن المواد الحبيبية كنسبة بين الأسمنت والركام الخليط Cement/Agrregates Ratio فمثلاً خلطة ١: ٦ أى جزء واحد أسمنت وستة أجزاء ركام بالوزن وتبين هذه النسبة مدى غنى او إفتقار الخرسانة Rich or Lean Mix فالخلطة ١ : ٤ تعتبر خلطة غنية أما الخلطة ١ : ٨ فتعتبر خلطة فقيرة.

- وقد تُبَيَن نسب المواد الحبيبية بما يحوية المتر المكعب للخرسانة الطازجة من الأسمنت والركام الصغير والركام الكبير على أن يُبين الأسمنت بالوزن والركام بالحجم تسهيلاً لتحضير الكميات عند الخلط فمثلا بخلطة .

أسمنت	رمل	حصى
٣٠٠ كيلوغرام	٠,٤ متر مكعب	٠,٨ متر مكعب

ومجموع هذة الكميات يعطى تقريبا بعد خلطها بالماء حوالى مترمكعب من الخرسانة الطرية او الطازجة.

- كما يمكن ان يُعبَر عن الأسمنت بعدد الاكياس للمتر المكعب من الخرسانة الطازجة وهذا العدد يسمى معامل الأسمنت Cement Factor فمثلًا خلطة يحتوى المتر المكعب منها على٦ اكياس أسمنت (الكيس يزن ٥٠كيلو غرام) وخلطة أخرى غنية يحتوى المتر المكعب.

منها على ٨ أكياس أو خلطة فقيرة يحتوى المتر المكعب منها على ٤ اكياس:

أسمنت	رمل	حصى
٦ اكياس	٠,٤م^{٣}	٠,٨ م^{٣}

- وتُبَيَن كمية الماء اللازمة للخلطة على هيئة نسبة من الأسمنت بالوزن فمثلا خلطة بها نسبة الماء الى الأسمنت = ٠,٥ بالوزن ، فاذا علم وزن الأسمنت فى المتر المكعب للخرسانة الطازجة أمكن تعيين وزن الماء اللازم له لإجراء الخلط وبالتالى يمكن تعيين حجم ذلك الماء باللتر. وأحياناً قد تُبَيَن كمية ماء الخلط اللازمة للمتر المكعب من الخرسانة الطازجة مباشرة فمثلا خلطة:

أسمنت	رمل	حصى	ماء
٣٠٠ كغم	٠,٤م^{٣}	٠,٨ م^{٣}	١٥٠ لتر

أى أن المتر المكعب من الخرسانة الطازجة لهذه الخلطة يلزم له ٣٠٠ كغم أسمنت (٦ اكياس) و ١٥٠ لتر ماء. وتحسب الكميات المطلوبة من المواد لأي خلطة تبعا لعدد الأمتار المكعبة الكلية من الخرسانة الطازجة.

❐ وتُبَيَن كمية الإضافات -إن وجدت- على أساس أنها نسبة مئوية من وزن الأسمنت المستخدم بالخلطة فمثلا خلطة:

أسمنت	رمل	حصى	ماء
٣٠٠ كج	٠,٤ م^3	٠,٨ م^3	١٥٠ لتر

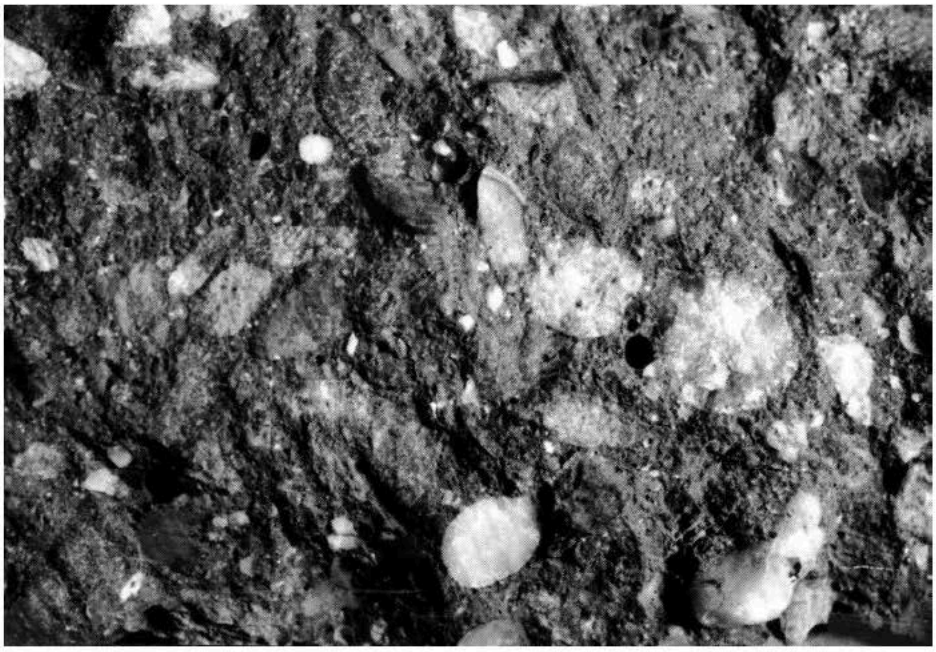
بها ٢ % ملدنات تعنى أن وزن الملدنات المستخدم = ٦ = ٠,٠٢ × ٣٠٠ كيلو غرام للمتر المكعب من الخرسانة الطازجة.

٣-العلاقة بين الركام والعجينة الاسمنتية Aggregate-Paste Relationship

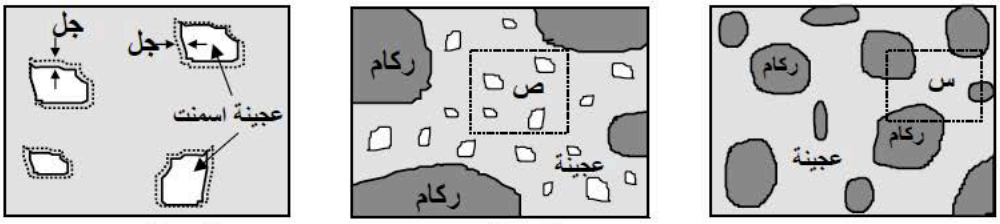
تتركب الخرسانة من عجينة أسمنتية (نشطة) وركام (خامل) وتعتمد مقاومة الخرسانة على مقاومة العجينة حيث أن مقاومة الركام كبيرة جداً بالنسبة لمقاومة العجينة. ولذلك فإن إنهيار الخرسانة التقليدية يكون دائماً فى العجينة وتمرالشقوق حول الركام. فإذا أمكننا إنتاج عجينة ذات مقاومة عالية جداً تقترب من مقاومة الركام فإننا نحصل على خرسانة عالية المقاومة High Strength Concrete والتى يكون الإنهيار فيها مفاجىء حيث تمر الشقوق بالركام) وليس حوله(ويشطره كما فى شكل (١).

ومن الجدير بالذكر ان قابلية تشغيل الخرسانة تنتج من تأثير احاطة وتخلخل وتلاصق العجينة للركام وتتأثر بمقدار سيولة العجينة .كما تعتمد نفاذية الخرسانة للسوائل على وجود واستمرار العجينة الأسمنتية. وبالإضافة الى ذلك فإن إنكماش الكتلة الخرسانية الدائم يكون ناتج من العجينة الأسمنتية وليس الركام.

والعجينة الأسمنتية تكون عبارة عن مُعلق Suspension للأسمنت فى الماء شكل (٢). وكلما خفة درجة تركيز المعلق كلما زادت المسافة بين حبيبات الأسمنت وبالنتيجة تضعف بنية العجينة. وهذا يوضح أن مقاومة الانضغاط للخرسانة دالة عكسية مع نسبة الماء إلى الأسمنت م/س. وعندما تبدأ عملية الإماهة للأسمنت فيتكون الجل من الماء ومن مادة سطح حبيبات الأسمنت والذى قد يصل حجمه الى ضعف حجم الأسمنت الناتج منه. وهكذا مع إستمرار الإماهه يستمر تكون الجل حول كل حبيبة حتى يتصل الجل ببعضه مكوناً بنية العجينة.



شكل (١) الكسر فى الخرسانة عالية المقاومة يمر خلال الركام وليس حوله.



تكبير الجزء س

تكبير الجزء ص

شكل (٢) علاقة العجينة الأسمنتية بالركام.

أولاً : الطريقة الوضعية Empirical Method

تحدد هذه الطريقة نسبياً لمكونات الخرسانة نتيجة الخبرة Experience السابقة للإستعمال بنجاح. وقد أثبتت هذه الطريقة ملائمتها وصلاحيتها للعمليات الصغيرة Small Jobs نظراً لسهولتها حيث تعطى المواد الصلبة (الأسمنت ، الرمل ، الحصى) على هيئة نسب بالوزن أو الحجم وقد تحدد كمية الماء اللازم أو تترك لمراعاتها أثناء الخلط بحيث نحصل على خلطة لدنة Plastic سهلة التشغيل Workable. ونسب مكونات الخرسانة بالاوزان المستخدمة عادة فى المنشآت طبقا لنوع الخرسانة أو طبقا لمقاومة الخرسانة للانضغاط هي كما يلى :

	الأسمنت	الرمل	الحصى	أى	الأسمنت	الركام
خلطة غنية ذات مقاومة عالية	١	١	٢		١	٣
خلطة متوسطة	١	٢	٤		١	٦
خلطة فقيرة ذات مقاومة منخفضة	١	٣	٥		١	٨

وذلك على أساس أن الركام مناسب والماء أقل ما يمكن لجعل الخلطة ذات قوام Consistency مناسب لتكون لدنة. والنسب الوضعية المستخدمة

أسمنت	رمل	حصى
س كغم	٠,٤ م٣	٠,٨ م٣

مع كمية الماء المناسبة والمعقولة وتتراوح قيمة الماء كنسبة من الأسمنت (W\C) من ٠,٤ إلى ٠,٧ بالوزن ويحدد كميتها طبيعة العمل. أما كمية الأسمنت "س" فيحددها نوع العمل والخلطة اللازمة له هل هي غنية أو فقيرة حيث تتراوح "س" من ٢٠٠ إلى ٤٠٠ كغم أى من ٤ إلى ٨ اكياس للمتر المكعب من الخرسانة. ويحدد كمية الأسمنت وكمية الماء المهندس المسئول عن مواصفات العملية تبعا لطبيعتها .

❐ وعيوب هذه الطريقة تتلخص فى النقاط الآتية:

١ـ نسبة الماء / الأسمنت (م/س) غير محددة ومتروكة لظروف العمل.
٢ـ النسبة المذآورة لا تعطى مترأ مكعبا فى جميع الحالات وقد يصل الحجم أحياناً إلى ١,٢ م٣.
٣ـ نسبة الرمل /الحصى شبه ثابة وهي ١ : ٢ مع ملاحظة إهمال نوع الركام وتدرجه والمقاس الإعتبارى الأكبر له وكذلك إهمال معاير النعومة للرمل.
٤ـ لا يمكن الحصول على بيانات صحيحة لخواص الخرسانة الناتجة وكذلك لا يمكن توقع قيمة دقيقة لمقاومة الانضغاط لهذه الخرسانة.

ثانياً : طريقة المحاولة Trial Method

تعتمد هذه الطريقة على معرفة نسبة W\C فى الخلطة الخرسانية ويلزم عمل إختبارات مقارنة بين المواد المختلفة والخلطات المتباينة. وتتطلب هذه الطريقة وجود عينات من الأسمنت والحصى والرمل كما يجب تحديد نسبة W\C وكذلك المقاومة المطلوبة.

❐ وفيما يلى ملخص لخطوات تصميم خلطة خرسانية بطريقة المحاولة:

- تؤخذ كمية من الأسمنت فى حدود ٢,٥ كغم .
- تحدد نسبة (م/س) من الخبرة أو من المنحنيات البيانية أو من الجداول.
- يخلط الأسمنت والماء لتكوين عجينة الأسمنت المكونة من أ ، ب.
- تحضر كمية من الرمل و الحصى ويفضل إستخدام الركام المشبع والسطح جاف كما يراعى ألا يزيد المقاس الإعتبارى الأكبر عن ١/٥ البعد الأصغر للمقطع وأن لا يزيد عن ٣/٤ المسافة بين أشياش حديد التسليح (أيهما أصغر).
- تضاف تدريجيا كميات من الرمل واحصىوتخلط الخلطة جيداً ثم يحدد قوام الخرسانة إلى أن تصل إلى الخلطة التى تعطى القوام المطلوب.
- توزن بعدذلك الكميات المتبقية ومنها تحسب الأوزان المستعملة.
- تحسب الكميات بالوزن والحجم المطلوبة لعمل خلطة الخرسانة المعتمدة لموقع العمل.

ثالثاً: طريقة الحجم المطلق Absolute Volume Method

تفترض هذه الطريقة أن الحجم المطلق للخرسانة هو مجموع الحجوم المطلقة للمواد المكونة للخرسانة Concrete Ingredients أى الحجم المطلق للأسمنت والرمل والزلط والماء كما يلى:

$$\text{Absolute Volume} = \frac{C}{G_c} + \frac{S}{G_s} + \frac{G}{G_g} + \frac{W}{1.0} = 1000 \text{ Liters}$$

حيث :

C = وزن الأسمنت بالكيلوغرام اللازم للمتر المكعب من الخرسانة .
S = وزن الرمل " " " " " " "
G = وزن الحصى " " " " " " "
W = وزن المـاء " " " " " " "

G_c , G_s , G_g = الوزن النوعى للأسمنت والرمل والحصى على التوالى

علماً بأن حجم واحد متر مكعب من الخرسانة = ١٠٠٠ لتر من الماء.

وفى هذه الطريقة يجب تحديد كلاً من متطلبات مقاومة الخرسانة المتصلدة Strength و قابلية التشغيل Workability الخرسانة الطرية:

١ـ كمية الأسمنت اللازمة للمتر المكعب من الخرسانة.
٢ـ نسبة الماء إلى الأسمنت بالوزن (م/س) أو كمية الماء للمتر المكعب من الخرسانة.
٣ـ نسبة الركام الصغير إلى الركام الكبير فى الركام المستخدم.
٤ـ الوزن النوعى للأسمنت والركام الكبير والركام الصغير.

وتحدد البيانات اعلاه من واقع الخبرة Experience ومن النتائج العملية Practice ومن الإختبارات المختبرية Laboratory Tests أى أننا نحدد قيمة C ، W/C ، G/S وكذلك نحدد الأوزان النوعية G_c G_s , G_g ثم تُطبق المعادلة السابقة الذكر لتعيين وزن كل من الرمل والحصى.واذا أُريد بيان النسب بين مكونات الخرسانة بالوزن للأسمنت وبالحجم للركام يلزم معرفة الوزن الحجمى لكل من الرمل والحصى (أى وزن المتر المكعب) وذلك من واقع الخبرة والتجارب.

❐ وتتضح تلك الطريقة فى المثال التالى :

المطلوب تصميم خلطة خرسانية بحيث تكون الخرسانة الطرية لدنة القوام Plastic وبحيث تكون الخرسانة المتصلدة ذات مقاومة انضغاط بعد ٢٨ يوم تساوى ٢٤٠ كغم/سم^{٢}. مع مراعاة أن ركام الخليط المستخدم يمر منه نسبة ٤٠ % من المنخل القياسى١٦/٣ مع العلم بأن :

الوزن النوعى للأسمنت =٣,١٥ كغم/سم^{٣}.
الوزن النوعى للركام الرمل أو الحصى =٢,٦٥كغم/سم^{٣}.
الوزن الحجمى للركام الرمل أو الحصى=١٧٠٠كغم/سم^{٣}.

الحـــل

أ ـ تُعين نسبة الركام الصغير (الرمل) إلى الركام الكبير(الحصى):يعتبر المار من المنخل القياسى (4.75) ١٦/٣هو الرمل والمحتجز عليه هو الحصى . إذن يتبين أن النسبة المئوية للرمل فى الخليط تساوى ٤٠% وبالتالى الحصى يساوى ٦٠%.

ملاحظة: هذه النسبة قد تفرض طبقا للخبرة والسوابق العملية ـ والنسبة الشائعة الإستخدام قد تفرض مباشرة على أساس٣٣ % للركام أي نسبة الرمل إلى الحصى تساوى ١ :٢

ب ـ تفرض آمية الأسمنت اللازمة للمتر المكعب من الخرسانة على أساس مقاومة الخرسانة المتصلدة بعد ٢٨ يوم أو على أساس أى متطلبات أخرى خاصة بمتانة الخرسانة أو الظروف التى تعمل فيها.

ومن الخبرة العملية يمكن إستخدام هذه العلاقة:

كمية الأسمنت اللازمة للمترالمكعب = مقاومةالانضغاط بعد ٢٨ يوم كغم/سم^{٢} + ٥٠إلى ١٠٠

إذن كمية الأسمنت اللازمة للمتر المكعب = ٦٠ + ٢٤٠ = ٣٠٠ كغم/م ٣ .

ج - تُعين كمية الماء اللازمة للمتر المكعب من الخرسانة طبقا لمحتوى الأسمنت فى الخلطة والمقاس الإعتبارى للركام المستخدم وكذلك درجة قابلية ألتشغيل المطلوبة. وهذه الكمية قد تفرض مباشرة طبقا للخبرة أو بالإستعانة بالجدول (١).

فى هذا المثال نفرض أن (م/س) = ٠,٥

إذن كمية الماء للمتر المكعب من الخرسانة = ١٥٠ لتر.

جدول (١) العلاقة بين كمية ماء الخلط ومحتوى الأسمنت.

المقاس الإعتبارى الأكبر للركام (مم)	قيمة W\C لمحتوى أسمنت كغم لكل متر مكعب خرسانة				
	٢٠٠	٢٥٠	٣٠٠	٣٥٠	٤٠٠
١٠	٠,٧٠	٠,٦٠	٠,٥٠	٠,٤٧٥	٠,٤٠
٢٠	٠,٦٥	٠,٥٥	٠,٤٥	٠,٤٢٥	٠,٣٨٥
٤٠	٠,٦١	٠,٤٨	٠,٤٢٥	٠,٣٨٥	٠,٣٧

د- يحسب تصميم الخلطة الخرسانية كما يلى :

وزن الحصى = (٦٠ / ٤٠) من وزن الرمل = ١,٥ وزن الرمل

$$\text{Absolute Volume} = \frac{300}{3.15} + \frac{S}{2.65} + \frac{1.5S}{2.65} + \frac{150}{1.0} = 1000 \text{ litres}$$

وزن الرمل ،، ،، ، ،، = ٨٠٠ كغم.

وزن الحصى ،، ،، ، ،، = ١٢٠٠ كغم.

❑ نسب الخلطة الخرسانية بالوزن :

أسمنت		رمل		حصى		ماء
٣٠٠كغم		٨٠٠ كغم		١٢٠٠كغم		١٥٠ كغم
١	:	٢,٦٧	:	٤	:	٠,٥

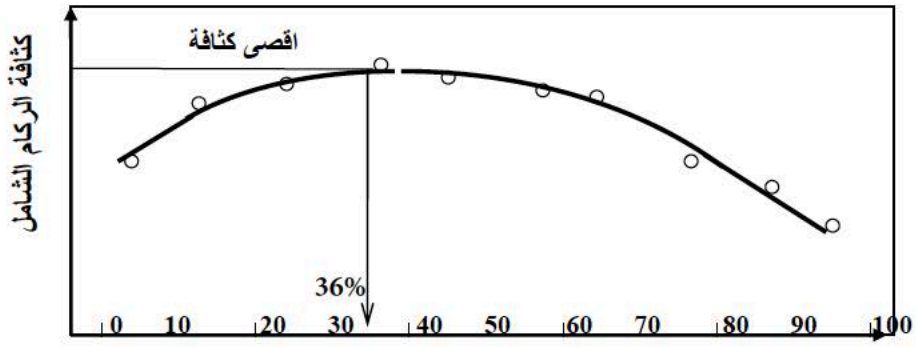
❑ نسبة الخلطة الخرسانية بالحجم :

أسمنت		رمل		حصى		ماء
$\frac{٣٠٠}{٥٠}$	اكياس	$\frac{٨٠٠}{١٧٠٠}$ م ٣		$\frac{١٢٠٠}{١٧٠٠}$ م ٣		١٥٠ لتر
٦ اكياس		٠,٤٧ م ٣		٠,٧١م ٣		١٥٠ لتر

وتجدر الأشارة إلى أن تعيين نسبة الركام الصغير (الرمل) إلى الركام الكبير (الحصى) يمكن أن يتم على أسس أخرى هامة منها :

أ- طريقة الكثافة القصوى Optimum Unit Weight Method

وفيها يتم عمل خلطات من الركام الجاف فقط تحتوى على نسباً مختلفة من الرمل إلى الركام الخليط فمثلًا : صفرر % ، ١٠ % ، ٢٠%، ....١٠٠ %مع تعيين وحدة الوزن لكل منها ثم نرسم القراءات على منحني ويمكن من هذا المنحنى إيجاد نسبة الرمل التى ستكون عندها وحدة الوزن نهاية قصوى أى الحصول على أقل نسبة فراغات ممكنة .ويتضح ذلك من شكل (٣) الذى يبين أن نسبة الرمل % ٣٦تعطى أقصى وحدة وزن لركام الخليط.



شكل (٣) الكثافة القصوى للركام الخليط

ب- طريقة المساحة السطحية للركام Surface Area Method

الأساس العلمى فى هذه الطريقة هو الربط بين كمية عجينة الأسمنت فى الخلطة الخرسانية والمساحة السطحية للركام الذى تغلف أسطحة لإتمام عملية الإلتصاق بين جبيباته ومعنى ذلك بأنه فى الخلطات الخرسانية ذات الركام الصغير المقاس فإنه يحتاج لزيادة كمية الأسمنت بسبب زيادة المساحة السطحية لهذا الركام. وإحدى طرق التعبير المذكورة هي إستخدام المساحة السطحية لركام الخليط ومقاومة الانضغاط للخرسانة وذلك بمعرفة مقاومة الانضغاط المطلوبة للخرسانة أو قد تفرض المساحة السطحية للركام الخليط بقيمة تتراوح من ٢٤ إلى ٢٦ سم٢/غم التى تعطى غالبا أكبر قيمة للمقاومة. وبالتالى نحدد التدرج المطلوب أو نسبة الرمل فى الركام الشامل.