



الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
كلية الهندسة المدنية

”دراسة في الخصائص الميكانيكية لخرسانة منتجة من ركام معاد تدويره”

”Study of The Mechanical Properties of Recycled Aggregate
Concrete”

دراسة أعدت لنيل درجة الدكتوراه في الهندسة المدنية - قسم الهندسة الإنشائية

إعداد:

م. تماضر هاني مقبل

إشراف:

د.م. قاسم الزحيلي

دمشق 2014



الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
كلية الهندسة المدنية

"دراسة في الخصائص الميكانيكية لخرسانة منتجة من ركام معاد تدويره"

دراسة أعدت لنيل درجة الدكتوراه في الهندسة المدنية - قسم الهندسة الإنشائية

إعداد المهندسة: **تماضر مقبل**
إشراف

د.م. قاسم الزحيلي

دمشق 2014

لجنة الحكم السادة الاساتذة:

| | | |
|--------------------------------------|--|-----------------------------------|
| كلية الهندسة المدنية عضواً | الأستاذ في قسم الهندسة الإنشائية الاختصاص: مقاومة المواد | أ. د. رياض العيسى جامعة دمشق |
| كلية الهندسة المدنية عضواً | الأستاذ في قسم الهندسة الإنشائية الاختصاص: ديناميك الإنشاءات | أ. د. محمد غريب جامعة دمشق |
| كلية الهندسة المدنية عضواً مشرفاً | الأستاذ المساعد في قسم الهندسة الإنشائية الاختصاص: الخرسانة المسلحة | د. قاسم الزحيلي جامعة دمشق |
| كلية الهندسة المدنية عضواً | الأستاذ المساعد في قسم الهندسة الإنشائية الاختصاص: الخرسانة المسلحة | د. عبد الحميد كيخيا جامعة دمشق |
| كلية الهندسة المدنية عضواً | المدرس في قسم الهندسة الإنشائية الاختصاص: الخرسانة المسلحة | د. هيثم زررور جامعة دمشق |

تصريح Declaration

إن هذه الأطروحة والتي هي بعنوان "دراسة في الخصائص الميكانيكية لخرسانة منتجة من ركام معاد تدويره"، قد أعدت للحصول على درجة الدكتوراة في الهندسة الإنشائية من جامعة دمشق - كلية الهندسة المدنية. إن العمل هو من إعداد الباحث بنفسه ما عدا ما تم الإشارة إليه ضمن النص، وهذا العمل لم يتم تقديمه للحصول على أية درجة أخرى .

المهندسة تماضر مقبل

ملخص البحث Abstract

تنبهت معظم الدول إلى أهمية إعادة تدوير النفايات الخرسانية لما لذلك من نفع كبير على كل المستويات سواء البيئي أو الاقتصادي أو الاجتماعي. حيث يشكّل الاستهلاك الكبير للمصادر الطبيعية وكم النفايات والمتراكم في المكبات تحدي كبير للبيئة.

تعتبر عملية إعادة تدوير النفايات الخرسانية من السبل الهامة جدا للتخلص من مشكلة تراكمها وبشكل يعود بالنفع الاقتصادي والبيئي. وقد ركزت العديد من الأبحاث الحديثة على استخدام الركام الناتج عن عملية تدوير الخرسانة في الإنشاء من جديد وقد تم إدخالها بشكل كبير في العناصر الغير حاملة كالسدود وبلاطات الأرضية وفي الطرقات .. الخ. ويتم العمل حاليا على دراسة إمكانية استخدامها في صب العناصر الإنشائية من خلال رفع كفاءة الخرسانة الناتجة بواسطة عدة وسائل منها استخدام الإضافات البوزولانية كونها تحسن المقاومة والديمومة معاً.

تم في هذا البحث إجراء دراسة تجريبية لتحديد أثر الركام الخشن المعاد تدويره على الخصائص الميكانيكية للخرسانة المنتجة منه كمقاومة الضغط والشد بالفلق ومعامل المرونة، كما تم دراسة أثره على قدرة تحمل الجوائز المسلحة المعرضة لانعطاف وذلك عندما يتم استخدامه بنسب مختلفة (0%، 50%، 75%، 100%) مع وبدون إضافات بوزولانية سواء تم استخدام هذه الإضافات كبديل عن الاسمنت أو كإضافة على الخلطة الخرسانية بنسبة 15% من وزن الاسمنت، تم في هذا البحث أيضا تقديم علاقة تم استنتاجها تجريبياً لحساب معامل المرونة لخرسانة منتجة من ركام معاد تدويره، أثبتت المقارنات التي تم إجراؤها إمكانية استخدامها من أجل هذا النوع من الخرسانة كونها أعطت تقارباً كبيراً مع القيم التجريبية لمعامل المرونة.

تم توسيع الدراسة التجريبية على الجوائز المسلحة من خرسانة منتجة من ركام معاد تدويره بشق تحليلي حيث تم إنشاء نموذج رياضي حاكي التجارب وأعطى نتائج قريبة منها، وتم من خلال هذا النموذج تغيير أبعاد جوائز التجربة ونسبة التسليح المستخدمة لدراسة أثر الركام المعاد تدويره على الانعطاف من أجل أنماط انهيار مختلفة، حيث تم وضع نسب تسليح أدنى وأعلى من نسبة التسليح الأعظمية. تمت الدراسة التحليلية للنموذج الرياضي باستخدام طريقة العناصر المحدودة (FEM)، واستخدام التحليل اللا خطي والذي يأخذ بعين الاعتبار لا خطية المادة (Materially Non- Linear Analysis, MNA)، كما تم أخذ أثر التماسك بين كل من الخرسانة وفولاذ التسليح.

أظهرت الدراسة الحالية تأثير الخصائص الميكانيكية المدروسة بوجود الركام المعاد تدويره حيث تتخفف مقاومة الضغط والشد بالفلق ومعامل المرونة كلما زادت نسبة الركام المعاد تدويره في الخلطة، كما أوضحت هذه الدراسة أثر البوزولانا الطبيعية في تحسين مقاومة الضغط وخاصة عندما تستخدم كإضافة بنسبة 15% من وزن الاسمنت مع نسبة 50% الركام المعاد تدويره، حيث أعطت مقومات تقدر بـ 97%، 103% من مقاومة الخرسانة بركام طبيعي في اليوم 28 و 120 على الترتيب. كما بينت الدراسة أن استخدام الركام المعاد تدويره في الجوائز الخاضعة لانعطاف لم تؤثر على قدرة تحمل الجوائز من أجل نسب تسليح لا تتجاوز نسبة التسليح الأعظمية وهي القيمة المنصوص عليها في الكودات، وبالتالي أثبت هذا البحث إمكانية استخدام الركام المعاد تدويره في العناصر المعرضة للانعطاف دون حدوث هبوط في المقاومة.

شكر وتقدير

Acknowledgments

الشكر الأول والأعظم لله عز وجل الذي فضله تتم الصالحات وأسأله عز وجل أن يتقبل مني هذا العمل خالص لوجه الكريم.

وأتوجه بأسمى آيات الشكر والعرفان لدكتور المشرف قاسم الزحيلي على كل ما قدمه خلال هذه الرحلة من دعم وإرشادات ومتابعة حثيثة لكل التفاصيل فلقد كان بحق أباً رعى ابنته بكل حرص واهتمام ومدّها دوماً بالمساندة والنصح والعون.

ولا يسعني إلا أن أتقدم بالشكر للأستاذ الدكتور أمجد زينو نائب رئيس الجامعة للشؤون الإدارية وشؤون الطلاب فهذا العمل لم يكن ليبرى النور لولاه.

كما أتوجه بالشكر الكبير إلى عميد كلية الهندسة المدنية الأستاذ الدكتور محمد غريب الذي لم يتردد قط في دفع مسيرة هذا العمل حتى اكتمل ووصل إلى بر الأمان

كل الشكر والامتنان أيضاً لأساتذة قسم الهندسة الإنشائية وباقي الأقسام ممن مدوا يد العون والمساعدة ولم يبخلوا بشيء لتستمر عجلة هذا العمل بالتقدم نحو الأمام، وأخص بالشكر الدكتور مصطفى بطيخة على الجهد العظيم والعون الكبيرة الذي قدمه ليكتمل هذا العمل بالشكل الأمثل، وكما أخص بالذكر أيضاً الدكتور إبراهيم فهدة على كل ما بذله خلال مسيرة هذه الرسالة. وكذلك لا بد لي أن أتوجه بالشكر الجزيل إلى أعضاء لجنة الحكم الأفاضل على القراءة الدقيقة وعلى الملاحظات القيمة والتي أغنت الأطروحة وساعدت على إخراجها بالشكل الأمثل.

وأقدم خالص شكري وتقديري لجميع الموظفين في مخبر البيتون في كلية الهندسة المدنية الذين كانوا الحضن الدافئ لهذا العمل والذين أخذوا به باتجاه الطريق الصحيح، وأخص بالذكر المهندس فراس علقم والمهندس فراس تجرة والسيد أكرم علوش على العون الكبير الذي بذلوه.

كما أحب أن أشكر أشخاصاً لولا نصحتهم لي لما حققت ما حققت، وأذكر هنا الدكتور باسل سليم عميد كلية الهندسة المدنية بجامعة اليرموك و الدكتور عارف سويداني نائب عميد الهندسة المعمارية بالجامعة الأوروبية.

الشكر أيضاً لكل من تعاون معي أفراداً وجهات وأخص بالشكر المهندس وليم بشارة رئيس قسم المخابر ومسؤول ضبط الإنتاج معاون المدير الفني لشؤون الإنتاج في معمل اسمنت عدرا الذي ساعد على تلبية معظم متطلبات البحث، كما أشكر الدكتور مدين الصافي وكذلك المهندس هاني دمر وأتمنى للجميع التوفيق والنجاح الدائم في حياتهم.

كذلك أشكر الفني معتصم الحارثي والسيد محمود سليمان وإدارة معمل الدياس ومعمل قرطومة ومعمل غنيم بإدارة أبو محمود على تجاوبهم ومساعدتهم لي حتى يتم تأمين احتياجات البحث أيضاً.

ويبقى الشكر الدائم والمستمر لوالدي ووالدتي نور حياتي وعوني الذي لا ينقطع أدامكما الله لي وجزاكما كل خير على ما تحملتماه من أعباء كثيرة خلال هذه الرحلة التي لم تكن لتسير كما سارت لولا وجودكما وتشجيعكما وصبركما واحتضانكما لي وكذلك مساعدتي على حل المشاكل التي صادفتها وتجاوز العقبات التي واجهتها.

ومن يستحق الذكر هنا أيضاً أولادي وفلذة كبدي يوسف وسارة كونهما عانياً وتحملاً معي الكثير حتى بلغت ما بلغت في تحصيلي العلمي، وأدعو الله أن يحفظهما ويسعدهما ويسد خطاهما على الدوام.

ولابد لي أن أشكر أخوتي وأخواتي وأزواجهم وأولادهم على وقوفهم بجانبني ودعمي لأتابع المسير وأصل إلى خط النهاية، وأخص بالذكر أبو شام لدعمه لي بكل الوسائل التي أتيت له وأسأل الله أن يوفقهم جميعاً ويسعدهم ويحقق آمالهم.

والشكر الأكيد لكل من ساهم ولو بكلمة ولم يتسع المجال لذكرهم من أصدقاء وأقارب وموظفين وعمال.

فهرس المحتويات Contents

| | |
|---------|---|
| iv..... | ملخص البحث |
| v..... | شكر وتقدير |
| vi..... | فهرس المحتويات |
| 1..... | الفصل الأول |
| 1..... | 1. مقدمة عامة |
| 1..... | 1.1 نظرة عامة |
| 3..... | 2.1 مشكلة البحث وأهميته |
| 4..... | 3.1 الهدف من البحث |
| 4..... | 4.1 طرائق البحث |
| 4..... | 5.1 محتويات الأطروحة |
| 6..... | الفصل الثاني |
| 6..... | 2. معلومات عامة عن إعادة تدوير الخرسانة |
| 6..... | 1.2 مقدمة |
| 6..... | 2.2 إعادة تدوير نفايات الهدم والبناء في العالم |
| 7..... | 1-2-2 الولايات المتحدة الأمريكية |
| 8..... | 2-2-2 اليابان |
| 8..... | 3-2-2 المملكة المتحدة |
| 9..... | 4-2-2 الاتحاد الأوروبي |
| 9..... | 5-2-2 هونغ كونغ |
| 9..... | 3.2 إعادة تدوير نفايات الهدم والبناء في الدول العربية |
| 10..... | 1-3-1 دولة الكويت |
| 10..... | 2-3-2 الإمارات العربية المتحدة: |
| 10..... | 3-3-2 المملكة العربية السعودية |
| 11..... | 4-3-2 مصر |
| 11..... | 5-3-5 سوريا |
| 12..... | 4.2 فوائد إعادة تدوير مخلفات الهدم والبناء |
| 13..... | 5.2 معوقات إعادة تدوير نفايات الهدم والبناء |
| 14..... | 6.2 عملية إعادة تدوير نفايات الهدم والبناء |
| 20..... | 7.2 الخلاصة |
| 21..... | الفصل الثالث |
| 21..... | 3. المراجعة البحثية |
| 21..... | 1.3 مقدمة |
| 21..... | 2.3 خصائص الركام المعاد تدويره من تكسير الخرسانة |
| 24..... | 3.3 تصنيف الركام المعاد تدويره |

| | | |
|----------------|---|----------|
| 27..... | مقارنة بين الركام الطبيعي والركام المعاد تدويره | 4.3 |
| 27..... | خصائص الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره..... | 5.3 |
| 28..... | الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره في الحالة الطازجة | 1-5-3 |
| 29..... | الخصائص الميكانيكية للخرسانة المتصلبة والمنتجة من ركام معاد تدويره | 2-5-3 |
| 34..... | علاقة إجهاد تشوه في الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره..... | 3-5-3 |
| 35..... | التماسك بين RAC وبين قضبان التسليح | 4-5-3 |
| 36..... | أثر RAC على سلوك الجوائز المسلحة الخاضعة للانعطف | 5-5-3 |
| 40..... | ديمومة الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره | 6.3 |
| 41..... | المنطقة الانتقالية بين الركام والعجينة الاسمنية في RAC | 7.3 |
| 43..... | استخدام الإضافات البوزولانية في الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره..... | 8.3 |
| 43..... | تعريف المواد البوزولانية | 1-8-3 |
| 43..... | أنواع المواد البوزولانية | 2-8-3 |
| 44..... | تأثير المواد البوزولانية على الخرسانة..... | 3-8-3 |
| 44..... | تفاعل المواد البوزولانية | 4-8-3 |
| 46..... | دراسات سابقة حول الإضافات البوزولانية | 5-8-3 |
| 48..... | البوزولانا الطبيعية في القطر العربي السوري..... | 6-8-3 |
| 49..... | جديد البحث | 9.3 |
| 51..... | الفصل الرابع..... | |
| 51..... | مواد البحث وطرائقه..... | 4 |
| 51..... | مقدمة | 1.4 |
| 52..... | المواد | 2.4 |
| 52..... | المواد الرابطة | 1-2-4 |
| 55..... | الملدن | 2-2-4 |
| 55..... | الركام الخشن | 3-2-4 |
| 60..... | الركام الناعم | 4-2-4 |
| 62..... | فولاذ التسليح: | 5-2-4 |
| 62..... | الخلطات الخرسانية | 3.4 |
| 64..... | صب العينات وإنضاجها | 4.4 |
| 65..... | الاختبارات | 5.4 |
| 65..... | هبوط المخروط | 1-5-4 |
| 66..... | المقاومة على الضغط | 2-5-4 |
| 67..... | مقاومة الشد الغير مباشر بالفلق | 3-5-4 |
| 68..... | معامل المرونة | 4-5-4 |
| 70..... | اختبار الانعطف | 5-5-4 |
| 73..... | الخلاصة | 6.4 |
| 74..... | الدراسة التجريبية على خرسانة منتجة من ركام معاد تدويره | 5 |
| 74..... | مقدمة: | 1.5 |
| 75..... | خصائص الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره بدون إضافات بوزولانية (المجموعة SI): | 2.5 |
| 75..... | هبوط المخروط | 1-2-5 |

| | | |
|-----------------|--|-----------|
| 76..... | الوزن الحجمي | 2-2-5 |
| 78..... | مقاومة الضغط | 3-2-5 |
| 79..... | مقاومة الشد بالفلق | 4-2-5 |
| 81..... | معامل المرونة | 5-2-5 |
| 82..... | خصائص الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره مع بوزولانا كبديل عن الاسمنت المجموعة SII | 3.5 |
| 82..... | مقاومة الضغط | 1-3-5 |
| 85..... | مقاومة الشد بالفلق | 2-3-5 |
| 87..... | معامل المرونة | 3-3-5 |
| 89..... | خصائص الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره مع بوزولانا كإضافة عن الاسمنت المجموعة SIII | 4.5 |
| 89..... | مقاومة الضغط | 1-4-5 |
| 93..... | مقاومة الشد بالفلق | 2-4-5 |
| 95..... | معامل المرونة | 3-4-5 |
| 97..... | دراسة الانعطاف لجوائز من خرسانة منتجة من ركام معاد تدويره | 5.5 |
| 97..... | الجائز المختبر | 1-5-5 |
| 98..... | المجموعة الأولى (ركام معاد تدويره بدون إضافات) | 2-5-5 |
| 100..... | المجموعة الثانية (ركام معاد تدويره مع بوزولانا كبديل عن الاسمنت) | 3-5-5 |
| 103..... | الخلاصة: | 6.5 |
| 104..... | الفصل السادس | |
| 104..... | علاقة تجريبية لمعامل المرونة في الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره | 6. |
| 104..... | مقدمة: | 1.6 |
| 104..... | علاقات معامل المرونة وفق بعض المراجع | 2.6 |
| 106..... | العلاقة المقترحة | 3.6 |
| 108..... | تطبيق العلاقة المقترحة على أبحاث تجريبية أخرى | 4.6 |
| 110..... | مقارنة العلاقة المقترحة مع علاقات سابقة | 5.6 |
| 113..... | الخلاصة | 6.6 |
| 114..... | الفصل السابع | |
| 114..... | الدراسة العددية باستخدام العناصر المحدودة | 7. |
| 114..... | مقدمة | 1.7 |
| 114..... | توصيف النموذج | 2.7 |
| 115..... | التحليل الإنشائي باستخدام طريقة العناصر المحدودة | 3.7 |
| 115..... | العناصر المستخدمة في النموذج باستخدام برنامج (ABAQUS(6.12 | 1-3-7 |
| 116..... | الشروط المحيطة للنموذج المدروس | 2-3-7 |
| 116..... | الأحمال المطبقة على النموذج | 3-3-7 |
| 116..... | نوع التحليل المستخدم في النموذج | 4-3-7 |
| 116..... | توصيف المواد المستخدمة في النمذجة | 5-3-7 |
| 126..... | التماسك بين الخرسانة وفولاذ التسليح | 6-3-7 |
| 131..... | دراسة أثر تقارب الشبكة | 4.7 |
| 131..... | شكل النموذج المدروس في برنامج ABAQUS | 5.7 |
| 132..... | التحقق من النموذج: | 6.7 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 132 | مقارنة بين النتائج التحليلية والتجريبية | 1-6-7 |
| 135 | التشوهات النسبية الرئيسية للجوائز المدروسة | 2-6-7 |
| 140 | مقارنة النتائج التحليلية مع اختلاف نسبة الركام المعاد تدويره | 3-6-7 |
| 141 | دراسة أثر الركام المعاد تدويره على تحمل الجوائز على الانعطاف | 7.7 |
| 154 | ملخص الدراسة التحليلية من أجل عدة نسب تسليح | 8.7 |
| 156 | الخلاصة | 9.7 |
| 157 | الفصل الثامن | |
| 157 | النتائج و التوصيات | .8 |
| 157 | النتائج: | 1.8 |
| 159 | التوصيات | 2.8 |
| 160 | المراجع | |

فهرس الأشكال

List of Figures

- الشكل (1-1) صور لمباني يتم تهديمها أو تهدمت بفعل الحروب أو الكوارث 1
- الشكل (2-1) الخيارات الخاصة بمخلفات الهدم والبناء 2
- الشكل (3-1) دورة حياة مواد الإنشاء 3
- الشكل (12-) نسبة النفايات الخرسانية التي يعاد تدويرها في بعض الدول (Paul, 2011) 7
- الشكل (2-2) البناء الأخضر في بريطانيا (Paul, 2011) 8
- الشكل (3-2) مبنى في ألمانيا تم إنشاؤه باستخدام RA (Paul, 2011) 9
- الشكل (4-2) محطات تكسير متنقلة تستخدم في الموقع (Abukersh, 2009) 16
- الشكل (5-2) وحدة إعادة التدوير (Abukersh, 2009) 16
- الشكل (6-2) نظام إعادة تدوير الخرسانة المتبع في اليابان (Paul, 2011) 17
- الشكل (7-2) أقسام وحدة إعادة تدوير نفايات الهدم والبناء (Abukersh, 2009) 17
- الشكل (8-2) الخطوات المتبعة في وحدات إعادة التدوير (Abukersh, 2009) 19
- الشكل (9-2) إزالة الشوائب العالقة بالركام بواسطة الغسل بالماء (Abukersh, 2009) 20
- الشكل (10-2) ربوتات لإعادة تدوير الخرسانة بشكل مباشر 20
- الشكل (1-3) خطوات المعالجة بالنقع للركام المعاد تدويره حسب (Tam et al, 2006) 34
- الشكل (2-3) علاقة إجهاد- تشوه من أجل RAC (Xiao et al, 2005) 35
- الشكل (3-3) علاقة إجهاد- تشوه من أجل RAC (Gonzalez et al, 2009) 35
- الشكل (4-3) علاقة قوة-سهم لجوائز من ركام طبيعي وركام معاد تدويره (MDTCM, 2014) 38
- الشكل (5-3) ترافق ظهور الشقوق مع الهبوط في القوة في منحني قوة- انتقال في النتائج التحليلية (Floros&Ingason, 2013) 38
- الشكل (6-3) علاقة قوة انتقال للجوائز المختبرة في دراسة (Yehia et al, 2014) 39
- الشكل (7-3) مراحل الخلط وفق الطريقة التقليدية ووفق طريقة المرحلتين (Tam et al, 2004) 42
- الشكل (8-3) المناطق الانتقالية الموجودة في الركام المعاد تدويره ضمن الخرسانة (Tam et al, 2004) 42
- الشكل (9-3) تأثير الإسمنت البوزولاني على المتانة بالمقارنة مع الإسمنت البورتلاندي العادي (الرفاعي، 2004) 48
- الشكل (10-3) أماكن توزيع المواد البوزولانية الطبيعية في سوريا (الرفاعي، 2004) 49
- الشكل (1-4) تل شبحان الحاوي في السويداء الحاوي على البوزولانا الطبيعية 54
- الشكل (2-4) قوام ولون البوزولانا الطبيعية المستخدمة في البحث 54
- الشكل (3-4) البوزولانا الطبيعية بعد طحنها لدرجة نعومة عالية 54
- الشكل (4-4) مخطط التحليل الحبي لخليط الركام الطبيعي الخشن المستخدم بالبحث 56
- الشكل (5-4) تجميع نفايات مخبر جامعة دمشق ونقلها إلى الكسارة للحصول على RA 57
- الشكل (6-4) الكسارة المستخدمة ونتاج فرز الركام الخشن المعاد تدويره 58
- الشكل (74-) التحليل الحبي لخليط الركام المعاد تدويره الخشن المستخدم بالبحث 58
- الشكل (8-4) التحليل الحبي لخليط الرمل المستخدم بالبحث 61
- الشكل (9-4) جهاز شد الحديد في الدراسة الحالية 62
- الشكل (10-4) الجبالة المستخدمة لخلط مكونات الخلطات في هذه الدراسة 64
- الشكل (11-4) حفظ العينات في حوض ماء 65
- الشكل (12-4) قياس هبوط المخروط مع الزمن 66
- الشكل (13-4) جهاز تحديد مقاومة الضغط للعينات المكعبية في هذه الدراسة 67
- الشكل (14-4) جهاز المستخدم لتحديد مقاومة الاسطوانات على الفلق 67

| | |
|----------|---|
| 68..... | الشكل (15-4) لصق الحوامل على أسطح المواشير من أجل اختبار معامل المرونة في هذه الدراسة |
| 69..... | الشكل (16-4) اختبار معامل المرونة في هذه الدراسة. |
| 69..... | الشكل (17-4) يوضح معاملات المرونة الثلاث. |
| 70..... | الشكل (18-4) منحني إجهاد تشوه حسب الكود الأوروبي (Eurocode, 2004). |
| 71..... | الشكل (19-4) رسم توضيحي لمقطع طولي وعرضي في الجائز المختبر. |
| 71..... | الشكل (20-4) القوالب الخشبية وكوفراج الحديد للجوائز المختبرة. |
| 72..... | الشكل (21-4) بعض الجوائز المصبوبة والمحفوظة في المخبر. |
| 72..... | الشكل (22-4) جهاز اختبار الانعطاف في هذه الدراسة. |
| 73..... | الشكل (23-4) كيفية ارتكاز الحمل مع ساعة قياس التشوهات والمساند المصممة. |
| 75..... | الشكل (1-5) قيم هبوط المخروط مع الزمن. |
| 76..... | الشكل (2-5) سرعة فقدان قابلية التشغيل للمجموعة SI. |
| 77..... | الشكل (3-5) الوزن الحجمي بحالته الرطبة والجافة. |
| 79..... | الشكل (4-5) مقاومات الضغط المكعبية f_{cu} من أجل كل عمر من الأعمار المدروسة منسوبة إلى مقاومة الضغط للخلطة R0 عند ذلك العمر |
| 79..... | الشكل (5-5) تطور مقاومة الضغط مع الزمن من أجل خلطات المجموعة SI |
| 80..... | الشكل (6-5) مقاومة الشد بالفلق منسوبة إلى مقاومة الشد بالفلق لـ R0 في اليوم 28 من أجل SI |
| 81..... | الشكل (7-5) قيم معامل المرونة لخلطات المجموعة SI منسوبة إلى معامل المرونة لـ R0 في اليوم 28. |
| 81..... | الشكل (8-5) مقاومة الضغط f_{cu} من أجل كل عمر من الأعمار المدروسة منسوبة إلى مقاومة الضغط للخلطة r-ROPZ عند ذلك العمر |
| 83..... | |
| 84..... | الشكل (9-5) تطور مقاومة الضغط مع الزمن من أجل خلطات المجموعة SII |
| 84..... | الشكل (10-5) مقارنة بين مقاومات الضغط في المجموعتين SI و SII في اليوم 28 |
| 85..... | الشكل (11-5) مقارنة بين مقاومات الضغط في المجموعتين SI و SII في اليوم 120 |
| 86..... | الشكل (12-5) مقاومات الشد بالفلق لخلطات SII منسوبة إلى مقاومة الشد بالفلق من أجل r-ROPZ في اليوم 28 |
| 86..... | الشكل (13-5) مقارنة بين مقاومات الشد بالفلق في المجموعتين SI و SII في اليوم 28 |
| 87..... | الشكل (14-5) مقارنة بين مقاومات الشد بالفلق في المجموعتين SI و SII في اليوم 120 |
| 88..... | الشكل (15-5) قيم معامل المرونة لخلطات المجموعة SII منسوبة إلى معامل المرونة لـ r-ROPZ في اليوم 28. |
| 88..... | الشكل (16-5) مقارنة بين معامل المرونة في المجموعتين SI و SII في اليوم 28 |
| 89..... | الشكل (17-5) مقارنة بين معامل المرونة في المجموعتين SI و SII في اليوم 120 |
| 90..... | الشكل (18-5) مقاومات الضغط f_{cu} من أجل كل عمر من الأعمار المدروسة منسوبة إلى مقاومة الضغط للخلطة a-ROPZ عند ذلك العمر |
| 91..... | الشكل (19-5) تطور مقاومة الضغط مع الزمن من أجل خلطات المجموعة SII. |
| 92..... | الشكل (20-5) مقارنة بين مقاومات الضغط في المجموعتين SI و SIII في اليوم 28 |
| 92..... | الشكل (21-5) مقارنة بين مقاومات الضغط في المجموعتين SI و SIII في اليوم 120 |
| 94..... | الشكل (22-5) مقاومات الشد بالفلق منسوبة إلى مقاومة الشد بالفلق من أجل a-ROPZ في اليوم 28. |
| 94..... | الشكل (23-5) مقارنة بين مقاومات الشد بالفلق في المجموعتين SI و SIII في اليوم 28 |
| 94..... | الشكل (24-5) مقارنة بين مقاومات الشد بالفلق في المجموعتين SI و SIII في اليوم 120 |
| 96..... | الشكل (25-5) نسبة معامل المرونة لخلطات المجموعة SIII بالمقارنة مع معامل المرونة لـ a-ROPZ في اليوم 28 |
| 96..... | الشكل (26-5) مقارنة بين معامل المرونة في المجموعتين SI و SIII في اليوم 28 |
| 97..... | الشكل (27-5) مقارنة بين معامل المرونة في المجموعتين SI و SIII في اليوم 120 |
| 98..... | الشكل (28-5) مقطع الجائز وتفصيلات التسليح والاستناد |
| 100..... | الشكل (29-5) علاقة قوة - انتقال لجوائز المجموعة الأولى SI (R0، R50، R100) الدراسة الحالية |
| 100..... | الشكل (30-5) شكل التشققات في بعض الجوائز المختبرة. |

| | |
|----------|--|
| 102..... | الشكل (31-5) علاقة قوة – انتقال لجوائز المجموعة الأولى SII وهم r-R50PZ ، r-R0PZ ، r-R100PZ . |
| 102..... | الشكل (32-5) مقارنة علاقة قوة- انتقال بين R0 و r-R0PZ |
| 102..... | الشكل (33-5) مقارنة علاقة قوة- انتقال بين R50 و r-R50PZ |
| 103..... | الشكل (34-5) مقارنة علاقة قوة- انتقال بين R100 و r-R100PZ |
| 108..... | الشكل (1-6) قيم معامل المرونة من أجل بارامترات هذا البحث وفق الكودات ووفق علاقات أخرى. |
| 110..... | الشكل (2-6) مقارنة القيم التجريبية للأبحاث المذكورة في الجدول (3-6) مع القيم الناتجة عن العلاقة المقترحة تخطيطياً من أجل مجال [-20%,+20%] |
| 110..... | الشكل (3-6) مقارنة القيم التجريبية للأبحاث المذكورة في الجدول (3-6) مع القيم الناتجة عن العلاقة المقترحة تخطيطياً من أجل مجال [-10%,+10%] |
| 112..... | الشكل (4-6) مقارنة قيم العلاقات المدروسة مع القيم الفعلية التجريبية من أجل للأبحاث المذكورة في الجدول (3-6) من أجل مجال |
| 112..... | الشكل (5-6) مقارنة قيم العلاقات المدروسة مع القيم الفعلية التجريبية من أجل للأبحاث المذكورة في الجدول (3-6) من أجل مجال |
| 113..... | الشكل (6-6) عدد الحالات التي أعطت فيها العلاقة المقترحة قيم أقرب للقيم التجريبية بالمقارنة مع (1988) Kakizaki ، و Zilich و Roos (2001) و Dhir (1999) |
| 115..... | الشكل (1-7) تمثيل العنصر الفراغي ذو ثماني عقد (ABAQUS 6.12 Documentation, 2012) |
| 115..... | الشكل (2-7) تمثيل العنصر الشبكي الفراغي ذو عقدتين (ABAQUS 6.12 Documentation, 2012) |
| 116..... | الشكل (3-7) شروط الاستناد المحيطية |
| 118..... | الشكل (4-7) مخطط الإجهاد – التشوه النسبي على الضغط (ABAQUS 6.12 Documentation, 2012) |
| 119..... | الشكل (5-7) مخطط الإجهاد - التشوه للخرسانة على الضغط وفق الكود الأوربي (Eurocode2 , 2004) (مكرر) |
| 121..... | الشكل (6-7) منحني إجهاد - تشوه للخرسانة على الضغط الخاص بـ R0 |
| 122..... | الشكل (7-7) منحني إجهاد- تشوه الخاص بـ R100 (الدراسة الحالية) |
| 123..... | الشكل (8-7) منحني إجهاد- تشوه الخاص بـ R50 (الدراسة الحالية) |
| 124..... | الشكل (9-7) مخطط الإجهاد – التشوه النسبي للبيتون على الشد (ABAQUS Ver6.12 Documentation ,2012) |
| 125..... | الشكل (10-7) منحني الإجهاد – التشوه النسبي للخرسانة على الشد من أجل R0 (الدراسة الحالية) |
| 125..... | الشكل (11-7) منحني الإجهاد – التشوه النسبي للخرسانة على الشد من أجل R50 (الدراسة الحالية) |
| 126..... | الشكل (12-7) منحني الإجهاد – التشوه النسبي للخرسانة على الشد من أجل R100 (الدراسة الحالية) |
| 126..... | الشكل (13-7) مخطط الإجهاد – التشوه النسبي لحديد التسليح المعتمد في الدراسة الحالية |
| 127..... | الشكل (14-7) أشكال مختلفة من النواض المستخدمة لتمثيل ظاهرة التماسك (CEB-FIP, 2000) |
| 127..... | الشكل (15-7) شكل النواض المستخدم في النمذجة من نوع (Spring 2) (ABAQUS Ver6.12 Documentation ,2012) |
| 128..... | الشكل (16-7) منحني إجهاد التماسك – انزلاق بين الخرسانة وفولاذ التسليح (CEB-FIP, 2010) |
| 129..... | الشكل (17-7) منحني إجهاد التماسك - انزلاق بين الخرسانة وفولاذ التسليح المعتمد في الدراسة الحالية من أجل R0 |
| 130..... | الشكل (18-7) منحني إجهاد التماسك - انزلاق بين الخرسانة وفولاذ التسليح المعتمد في الدراسة الحالية من أجل R50 |
| 130..... | الشكل (19-7) منحني إجهاد التماسك - انزلاق بين الخرسانة وفولاذ التسليح المعتمد في الدراسة الحالية من أجل R100 |
| 131..... | الشكل (20-7) دراسة أثر تقارب تقسيم الشبكة للنموذج المدروس |
| 132..... | الشكل (21-7) النموذج المعتمد في الدراسة باستخدام برنامج (ABAQUS ver6.12) |
| 132..... | الشكل (22-7) مقارنة علاقة القوة- الانتقال في منتصف مجاز الجانز الخرساني المسلح الناتجة عن الدراسة التجريبية الحالية مع التي نتجت من الدراسة التحليلية باستخدام ABAQUS ver6.12 وذلك لـ R0 |
| 133..... | الشكل (23-7) مقارنة علاقة القوة- الانتقال في منتصف مجاز الجانز الخرساني المسلح الناتجة عن الدراسة التجريبية الحالية مع التي نتجت من الدراسة التحليلية باستخدام ABAQUS ver6.12 وذلك لـ R50 |
| 133..... | الشكل (24-7) مقارنة علاقة القوة- الانتقال في منتصف مجاز الجانز الخرساني المسلح الناتجة عن الدراسة التجريبية الحالية مع التي نتجت من الدراسة التحليلية باستخدام ABAQUS ver6.12 وذلك لـ R100 |
| 134..... | الشكل (25-7) شكل علاقة قوة انتقال من أجل نسبتي تسليح 0.653% و 0.256% بحسب (Cadamuro et al, 2010) |
| 135..... | الشكل (26-7) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=0.61$ mm في R0 |

- الشكل (27-7) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=0.69$ mm في R0 135
- الشكل (28-7) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=1.78$ mm في R0 وبدء سيلان فولاذ التسليح 136
- الشكل (29-7) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=3.8$ mm في R0 وحدث الانهيار 136
- الشكل (30-7) شكل الانهيار الحاصل في التجربة من أجل R0 136
- الشكل (31-7) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=0.6$ mm في R50 137
- الشكل (32-7) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=0.72$ mm في R50 137
- الشكل (33-7) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=1.86$ mm في R50 138
- الشكل (34-7) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=2.17$ mm في R50 وبدء سيلان فولاذ التسليح 138
- الشكل (35-7) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=4.3$ mm في R50 وحدث الانهيار 138
- الشكل (36-7) تشقق الجائز R50 وانهياره تجريبياً 139
- الشكل (37-7) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=0.62$ mm في R100 139
- الشكل (38-7) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=1.72$ mm في R100 139
- الشكل (39-7) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=2.16$ mm في R100 وبدء سيلان فولاذ التسليح 140
- الشكل (40-7) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=5$ mm في R100 وحدث الانهيار 140
- الشكل (41-7) تشقق الجائز R100 وانهياره تجريبياً 140
- الشكل (42-7) نتائج الدراسة التحليلية للجوائز الثلاثة R0، R50، R100 (الدراسة الحالية) 141
- الشكل (43-7) المقطع الطولي والعرضي للجائز الثاني المدروس تحليلياً 142
- الشكل (44-7) منحنيات قوة- انتقال للجوائز المسلحة الثلاثة R0، R50، R100 من أجل $\mu_s = 0.76\%$ 143
- الشكل (45-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند بدء التشقق في الجائز R0 عند $\delta= 2.22$ mm 143
- الشكل (46-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند بدء التشقق في الجائز R50 عند $\delta= 2.23$ mm 143
- الشكل (47-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند بدء التشقق في الجائز R100 عند $\delta= 2.20$ mm 143
- الشكل (48-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند سيلان التسليح وتشكل المفصل اللدن في الجائز R0 عند $\delta= 10.5$ mm 144
- الشكل (49-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند سيلان التسليح وتشكل المفصل اللدن في الجائز R50 عند $\delta= 10.53$ mm 144
- الشكل (50-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند سيلان التسليح وتشكل المفصل اللدن في الجائز R100 عند $\delta=11.19$ mm 144
- الشكل (51-7) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجائز R0 144
- الشكل (52-7) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجائز R50 145
- الشكل (53-7) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجائز R100 145
- الشكل (54-7) منحنيات قوة- انتقال للجوائز المسلحة الثلاثة R0، R50، R100 من أجل $\mu_{s\max} = 1.53\%$ 145
- الشكل (55-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند سيلان التسليح وتشكل المفصل اللدن في الجائز R0 عند $\delta=15.53$ mm 146
- الشكل (56-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند سيلان التسليح وتشكل المفصل اللدن في الجائز R50 عند $\delta=16.32$ mm 146
- الشكل (57-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند سيلان التسليح وتشكل المفصل اللدن في الجائز R100 عند $\delta=16.73$ mm 146
- الشكل (58-7) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجائز R0 147
- الشكل (59-7) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجائز R50 147
- الشكل (60-7) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجائز R100 147
- الشكل (61-7) منحنيات قوة- انتقال للجوائز المسلحة الثلاثة R0، R50، R100 من أجل $\mu_s = 2.3\%$ 148
- الشكل (62-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند بدء التشقق في الجائز R0 عند $\delta=7.68$ mm 148
- الشكل (63-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند بدء التشقق في الجائز R50 عند $\delta=7.53$ mm 148
- الشكل (64-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند بدء التشقق في الجائز R100 عند $\delta=7.50$ mm 149
- الشكل (65-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند ذروة المنحني في الجائز R0 والموافقة لـ $\delta=17.76$ mm 149
- الشكل (66-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند ذروة المنحني في الجائز R50 والموافقة لـ $\delta=17.8$ mm 149
- الشكل (67-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند ذروة المنحني في الجائز R100 والموافقة لـ $\delta=18.01$ mm 149

- الشكل (68-7) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجائز R0..... 150
- الشكل (69-7) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجائز R50..... 150
- الشكل (70-7) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجائز R50..... 150
- الشكل (71-7) منحنيات قوة- انتقال للجوائز المسلحة الثلاثة R0 ، R50 ، R100 من أجل $\mu_{sb} = 3.1\%$ 151
- الشكل (72-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند ذروة المنحني في الجائز R0 والموافقة لـ $\delta=14.79$ mm..... 151
- الشكل (73-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند ذروة المنحني في الجائز R50 والموافقة لـ $\delta=15.14$ mm..... 151
- الشكل (74-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند ذروة المنحني في الجائز R100 والموافقة لـ $\delta=15.59$ mm..... 152
- الشكل (75-7) منحنيات قوة- انتقال للجوائز المسلحة الثلاثة R0 ، R50 ، R100 من أجل $\mu_s = 4.6\%$ 152
- الشكل (76-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند ذروة المنحني في الجائز R0 والموافقة لـ $\delta=13.04$ mm..... 153
- الشكل (77-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند ذروة المنحني في الجائز 05R والموافقة لـ $\delta=13.52$ mm..... 153
- الشكل (78-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند ذروة المنحني في الجائز R100 والموافقة لـ $\delta=13.73$ mm..... 153
- الشكل (79-7) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجائز R0..... 153
- الشكل (80-7) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجائز R50..... 154
- الشكل (81-7) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجائز R100..... 154
- الشكل (82-7) القوة الأعظمية للجوائز R0 ، R50 ، R100 منسوبة للقوة الأعظمية لـ R0 من الركاب المعاد تدويره من أجل نسب تسليح مختلفة..... 155

فهرس الجداول List of Tables

| | |
|---------|--|
| 7..... | الجدول (1-2) نسبة نفايات المباني بالمقارنة مع مجمل النفايات ونسبة نفايات الهدم التي يعاد تدويرها (Tam et al, 2008) |
| 15..... | الجدول (2-2) نسب كل نوع من النفايات بحسب نوع الموقع (Tam et al, 2008) |
| 22..... | الجدول (1-3) قيم الفاقد في اختبار لوس انجلوس من أجل أحجام مختلفة (Kou, 2005) |
| 23..... | الجدول (2-3) متطلبات الركام المعاد تدويره حسب (BS 8500-2:2002)، (Abukersh, 2009) |
| 23..... | الجدول (3-3) الحدود العليا المسموح بها للشوائب (Crawford and Cullum, 2001) |
| 24..... | الجدول (4-3) الحدود العليا للعناصر الكيميائية الضارة (Okionomou, 2005) |
| 25..... | الجدول (5-3) التصنيفات هي حسب معايير ألمانية (Dutch Standard NEN 5950,1995) (Paul, 2011) |
| 26..... | الجدول (6-3) تصنيفات واشتراطات حسب بعض الكودات العالمية (Paul, 2011) |
| 27..... | الجدول (7-3) متطلبات الخواص الفيزيائية للركام المعاد تدويره حسب (Koji, 2005) |
| 27..... | الجدول (8-3) مقارنة بين الخصائص الفيزيائية للركام الطبيعي والركام المعاد تدويره (Gomez (2002) |
| 31..... | الجدول (9-3) ملخص لنتائج دراسات سابقة (Paul, 2011) |
| 36..... | الجدول (10-3) مقارنة نتائج إجهاد التماسك التجريبي مع المحسوب وفق بعض العلاقات (Kim et al. 2012) |
| 39..... | الجدول (11-3) تفاصيل الجوائز المختبرة في دراسة (Yehia et al, 2014) |
| 45..... | الجدول (12-3) مكونات الكلينكر والصيغ الكيميائية لها (الرفاعي، 2004) |
| 51..... | الجدول (1-4) تصنيف الخرسانة بحسب مقاومتها على الضغط (Abukersh, 2009) |
| 52..... | الجدول (2-4) المواصفات الفيزيائية لاسمنت المستخدم في الدراسة الحالية |
| 53..... | الجدول (3-4) الخواص الكيميائية لاسمنت المستخدم |
| 53..... | الجدول (4-4) الخواص المنبرالية لاسمنت المستخدم في هذه الدراسة |
| 55..... | الجدول (5-4) الخواص الفيزيائية للبورولانا المستخدمة في البحث |
| 55..... | الجدول (6-4) الخواص الكيميائية للبورولانا المستخدمة في البحث |
| 57..... | الجدول (7-4) خواص الركام الطبيعي الخشن المستخدم في البحث |
| 59..... | الجدول (8-4) خواص الركام المعاد تدويره الخشن المستخدم في البحث |
| 60..... | الجدول (9-4) مقارنة بين خواص الركام الطبيعي والمعاد تدويره الخشن المستخدم في البحث |
| 61..... | الجدول (10-4) خصائص الرمل المستخدم في البحث |
| 62..... | الجدول (11-4) خصائص التسليح المستخدم في البحث |
| 63..... | الجدول (12-4) ترميز الخلطات المعتمدة في البحث |
| 64..... | الجدول (13-4) مكونات الخلطات للمجموعات المعتمدة في البحث |
| 65..... | الجدول (14-4) عدد العينات التي تم صبها والاختبارات التي تم إجراؤها |
| 74..... | الجدول (1-5) التجارب التي تم إجراؤها من أجل كل مجموعة |
| 77..... | الجدول (2-5) قيم الأوزن الحجمية لخلطات المجموعة SI |
| 78..... | الجدول (3-5) قيم مقاومات الضغط عند الأعمار المدروسة من أجل النسب الأربعة من RA |
| 80..... | الجدول (4-5) قيم الشد بالفلق والشد المباشر للمجموعة SI |
| 81..... | الجدول (5-5) قيم معامل المرونة للمجموعة SI |
| 82..... | الجدول (6-5) قيم مقاومات الضغط عند الأعمار المدروسة من أجل النسب الأربعة من RA للمجموعة SII |
| 85..... | الجدول (7-5) قيم الشد بالفلق للمجموعة SII في اليومين 28 و120 |
| 87..... | الجدول (8-5) قيم معامل المرونة للمجموعة SII في اليومين 28 و120 |
| 90..... | الجدول (9-5) قيم مقاومات الضغط عند الأعمار المدروسة من أجل النسب الأربعة من RA للمجموعة SIII |

| | |
|--|---|
| 93..... | الجدول (10-5) قيم الشد بالفلق للمجموعة SIII في اليومين 28 و120 |
| 95..... | الجدول (11-5) قيم معامل المرونة للمجموعة SIII في اليومين 28 و120، |
| 99..... | الجدول (12-5) قيم الانتقال الشاقولي منتصف المجاز للجوائز المختبرة في المجموعة SI |
| 101..... | الجدول (13-5) قيم الانتقال للجوائز المختبرة من المجموعة SII |
| 106..... | الجدول (1-6) مقارنة بين قيم معامل المرونة المحسوبة وفق العلاقات الكودات وعدد من الباحثين وبين القيم التجريبية لهذا البحث... |
| 107..... | الجدول (2-6) مقارنة بين معامل المرونة من العلاقة المقترحة والقيم التجريبية |
| الجدول (3-6) مقارنة معامل المرونة التجريبي $E_{c(exp)}$ مع معامل المرونة المقابل المحسوب من العلاقة المقترحة $E_{c(equ)}$ من أجل عدد | |
| 109..... | من الأبحاث السابقة |
| 111..... | الجدول (4-6) قيم معامل المرونة وفق بعض المراجع والعلاقة المقترحة من أجل دراسات سابقة |

الرموز Symbols

| | |
|---|---------------|
| مساحة المقطع العرضي للعيينة الخرسانية. | A_c |
| معامل انخفاض القساوة المرنة للبيتون على الضغط. | d_c |
| معامل انخفاض القساوة المرنة للبيتون على الشد. | d_t |
| معامل مرونة الخرسانة القاطع مقدراً بالـ N/mm^2 . | E_c |
| معامل مرونة الخرسانة الناتج عن التجربة مقدراً بالـ GPa. | $E_{c(exp)}$ |
| معامل مرونة الخرسانة الناتج عن العلاقة المقترحة مقدراً بالـ GPa. | $E_{c(equ)}$ |
| معامل المرونة الابتدائي غير المتشقق للخرسانة. | E_o |
| معامل مرونة فولاذ التسليح. | E_s |
| مجاز الجائز الخرساني مقدراً بالـ mm. | L |
| المسافة بين نقطتي تثبيت الحوامل على العينة الموشورية في اختبار معامل المرونة مقدراً بالـ mm. | l |
| التشوه الطولي الحاصل على الطول l في اختبار معامل المرونة مقدراً بالـ mm. | Δl |
| القوة المطبقة على العينة مقدرة بالـ N. | P |
| القوة الأعظمية التي تحملها الجائز الخرساني مقدرة بالـ KN. | P_{max} |
| القوة الأعظمية التي تحملها الجائز الخرساني بركام طبيعي مقدرة بالـ KN. | P_{0max} |
| الانزلاق النسبي بين قضبان التسليح والخرسانة عند النقطة المدروسة مقدراً بالـ mm. | S |
| قيمة الانزلاق عند وصول إجهاد التماسك بين الخرسانة وحديد التسليح إلى القيمة الأعظمية τ_{max} مقدراً بالـ mm. | S_1 |
| قيمة الانزلاق عند بدء انخفاض إجهاد التماسك بين الخرسانة وحديد التسليح عن القيمة الأعظمية τ_{max} مقدراً بالـ mm. | S_2 |
| قيمة الانزلاق عند وصول إجهاد التماسك بين الخرسانة وحديد التسليح إلى القيمة الأصغرية τ_f مقدراً بالـ mm. | S_3 |
| الإجهاد الذي تتحمله الخرسانة على الضغط. | σ_c |
| الإجهاد المقابل للتلدن الأولي للخرسانة على الضغط. | σ_{co} |
| الإجهاد الحدي للخرسانة على الضغط. | σ_{cu} |
| إجهادات الشد في الخرسانة. | σ_t |
| إجهاد الانهيار على الشد والموافق لتشكل أول شق دقيق في الخرسانة. | σ_{to} |

| | |
|--|-------------------------|
| تشوه التحطم للخرسانة على الضغط. | ε_c^{in} |
| التشوه الطولي النسبي في اختبار معامل المرونة. | ε_c |
| تشوهات لدنة على الضغط في الخرسانة. | ε_c^{pl} |
| تشوه التشققات على الشد | ε_t^{ck} |
| تشوهات لدنة على الشد في الخرسانة. | ε_t^{pl} |
| قيم التشوهات النسبية للخرسانة الموافقة للإجهاد الأعظمي f_{cm} . | ε_{c1} |
| قيمة التشوه النسبي الأعظمي للخرسانة على الضغط. | ε_{cu1} |
| التشوه المرن الموافق للخرسانة قبل التحطم على الضغط. | ε_{oc}^{el} |
| التشوه المرن الموافق للخرسانة قبل التشقق على الشد. | ε_{ot}^{el} |
| قيم التشوهات النسبية لفولاذ التسليح الموافقة للإجهاد الأعظمي f_y . | ε_y |
| المقاومة المكعبية لمادة الخرسانة على الضغط مقدرة بالـ N/mm^2 . | f_c' |
| المقاومة المكعبية لمادة الخرسانة على الضغط مقدرة بالـ N/mm^2 . | f_{cu} |
| المقاومة على الضغط لخرسانة من ركام طبيعي مقدرة بالـ N/mm^2 . | f_{c0} |
| المقاومة المميزة لمادة الخرسانة على الضغط عند عمر 28 يوم مقدرة بالـ N/mm^2 . | f_{ck} |
| المقاومة على الضغط بعد 28 يوم بشروط الحفظ النظامية مقدرة بالـ N/mm^2 . | f_{cm} |
| إجهاد الشد الأعظمي الذي تتحمله الخرسانة مقدراً بالـ N/mm^2 . | f_{ctm} |
| إجهاد الشد بالفلق الذي تتحمله الخرسانة مقدرة بالـ N/mm^2 . | f_{sp} |
| إجهاد السيلان في فولاذ التسليح. | f_y |
| إجهاد التماسك بين الخرسانة وفولاذ التسليح عند الانهيار مقدراً بالـ N/mm^2 . | τ_f |
| إجهاد التماسك الأعظمي بين الخرسانة وفولاذ التسليح مقدراً بالـ N/mm^2 . | τ_{max} |
| الوزن الحجمي للخرسانة مقدراً بالـ Kg/m^3 . | ρ |
| الوزن الحجمي للخرسانة بركام طبيعي مقدراً بالـ Kg/m^3 . | ρ_0 |
| الانتقال الشاقولي الحاصل في منتصف مجاز الجائز الخرساني مقدراً بالـ mm . | δ |

المختصرات *Abbreviations*

| | |
|--|---------|
| نفايات هدم المباني (Construction & Demolition Wastes) | C&D W |
| نموذج اللدونة-التلف للخرسانة (Concrete Damaged Plasticity Model) | CDP |
| درجات الحرية (Degree of Freedoms) | DOF |
| طريقة العناصر المحدودة (Finite Element Method) | FEM |
| المنطقة الانتقالية بين الركام والعجينة الاسمنتية (Interfacial Transition Zone in RAC) | ITZ |
| التحليل اللاخطي للمادة (Materially Non-Linear Analysis) | MNA |
| الركام الطبيعي (Natural Aggregate) | NA |
| الخرسانة المنتجة من ركام طبيعي (Natural Aggregate Concrete) | NAC |
| الطريقة التقليدية بتحضير الخلطة الخرسانية (Normal Mixing Approach) | NMA |
| المواد البوزولانية (Natural Pozzolana) | PZ |
| الركام المعاد تدويره (Recycled Aggregate) | RA |
| الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره (Recycled Aggregate Concrete) | RAC |
| الكثافة لحالة ركام مشبع السطح (Saturated Surface Density) | SSD |
| طريقة وضع الماء مع الخلطة الخرسانية على مرحلتين (Two-Stage Mixing Approach) | TSMA |
| نسبة الماء إلى الاسمنت (Water To cement Ratio) | W/C |
| الخلطة الخرسانية مع ركام طبيعي فقط. | R0 |
| الخلطة الخرسانية المنتجة من 50% من ركام معاد تدويره. | R50 |
| الخلطة الخرسانية المنتجة من 75% من ركام معاد تدويره. | R75 |
| الخلطة الخرسانية المنتجة من 100% من ركام معاد تدويره. | R100 |
| الخلطة الخرسانية مع ركام طبيعي فقط مع بوزولانا كبديل عن الاسمنت بـ 15% من وزنه. | r-R0PZ |
| الخلطة الخرسانية مع 50% من الركام المعاد تدويره مع بوزولانا كبديل عن الاسمنت بـ 15% من | r-R50PZ |

| | |
|---|----------|
| وزنه. | |
| الخلطة الخرسانية مع ركام 75% من الركام المعاد تدويره مع بوزولانا كبديل عن الاسمنت بـ 15% من وزنه. | r-R75PZ |
| الخلطة الخرسانية مع 100% من الركام المعاد تدويره مع بوزولانا كبديل عن الاسمنت بـ 15% من وزنه. | r-R100PZ |
| الخلطة الخرسانية مع ركام طبيعي فقط مع بوزولانا كإضافة على الخلطة بـ 15% من وزن الاسمنت | a-R0PZ |
| الخلطة الخرسانية مع 50% من الركام المعاد تدويره مع كإضافة على الخلطة بـ 15% من وزن الاسمنت. | a-R50PZ |
| الخلطة الخرسانية مع ركام 75% من الركام المعاد تدويره مع بوزولانا كإضافة على الخلطة بـ 15% من وزن الاسمنت. | a-R75PZ |
| الخلطة الخرسانية مع 100% من الركام المعاد تدويره مع بوزولانا كإضافة على الخلطة بـ 15% من وزن الاسمنت. | a-R100PZ |

الفصل الأول

مقدمة عامة

General Introduction

1.1 نظرة عامة:

Overview

مع النمو الاقتصادي للدول والرغبة في بناء المدن الحديثة ازداد الطلب بصورة كبيرة على استخدام الخرسانة المسلحة (Reinforced Concrete) وأصبحت الخرسانة (Concrete) هي مادة البناء الرئيسية لأكثر المباني، وبالنتيجة ازدادت حركة التنقيب عن الصخور في المقالع للحصول على الركام أحد أهم مكونات الخرسانة، وبحسب إحصائيات أجريت في وقت سابق فإن الاحتياج العالمي للركام الطبيعي (Natural Aggregate, NA) تجاوز 26 بليون طن في عام 2011 (Akbari et al, 2011)، الأمر الذي يشكل تحدياً وتهديداً للبيئة والموارد الطبيعية.

وفي نهاية العقد الأخير من القرن العشرين تزايدت حركة هدم وإعادة إعمار المباني، مما أدى إلى تراكم كميات كبيرة من المخلفات التي تشكل الخرسانة جزءاً كبيراً منها، وطبقاً لإحصاءات غير مكتملة، تبلغ كمية مخلفات هدم المباني (Construction & Demolition Wastes, C&D W) سنوياً حوالي 200 مليون طن (Abukersh, 2009)، والتي سببها إما انتهاء العمر التصميمي للمنشأ، أو الحاجة لإنشاء مباني جديدة تلبي حاجات جديدة تنسجم وتتطور المجتمع، أو قد تكون بسبب الحروب والكوارث الطبيعية كما يوضح الشكل (1-1).



الشكل (1-1) صور لمباني يتم تهديمها أو تهدمت بفعل الحروب أو الكوارث (جاروشة، 2013)

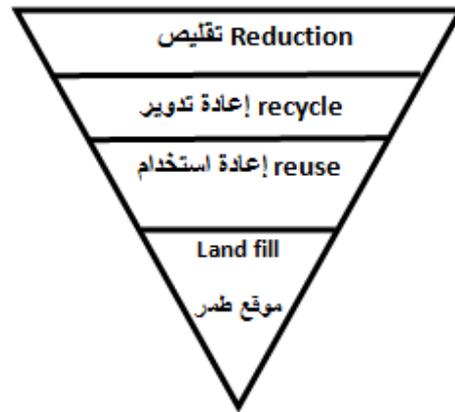
إن تراكم المخلفات الإنشائية للمباني على جوانب الطرق أو في المساحات الفارغة يسهم في خلق مشكلات ومخاطر اجتماعية واقتصادية وحضارية للفرد والمجتمع المدني، تلقي بظلالها كذلك على تنامي المخاطر الصحية الناتجة عن الملوثات

البيئية، ويفترض أن تتم المعالجة لها من خلال الطريقة العلمية المناسبة التي يطلق عليها "تدوير وإعادة استخدام مخلفات المباني" (The reutilizing and recycling C&D W) بغرض استخدامها في تصنيع مواد جديدة.

ازدادت الاهتمام بالمسائل البيئية في بعض الدول كالولايات المتحدة واليابان والمملكة المتحدة وألمانيا.... الخ وبدأ العاملون في مجال البيئة والذين يدركون أهمية تطبيق إعادة التدوير بالحث عليه وجعله خيار لا بد منه أمام المقاولين والمنتجين وذلك من خلال سن العديد من القوانين مثل منع استخراج الركام من المقالع القريبة من المدينة وفرض ضرائب على استخدام مكبات النفايات كوسيلة للتشجيع على إعادة تدوير مخلفات البناء واستعمالها مجدداً في صناعة التشييد (Construction industry)، حيث تم من أجل ذلك تقديم المواصفات اللازمة لإعادة استخدام المخلفات الخرسانية.

بالنظر إلى الوضع حالياً، أصبح بناء المدن والقرى اتجاه لا يمكن إعاقة في تنمية المجتمع، لذلك لا بد من التعامل مع هذه المسألة بشكل صحيح وذلك من خلال تطبيق مبدأ التنمية المستدامة الذي يراد منه الحفاظ على الموارد الطبيعية والعمل في حدود الطاقة الاستيعابية للبيئة ويأتي ضمن هذا الإطار إعادة استخدام أو تدوير مخلفات الهدم، والتي هي أحد أكبر مكونات التنمية المستدامة كما سنلاحظ عند استعراض فوائد هذه العملية وأثرها الكبير على الجوانب البيئية والاقتصادية والاجتماعية.

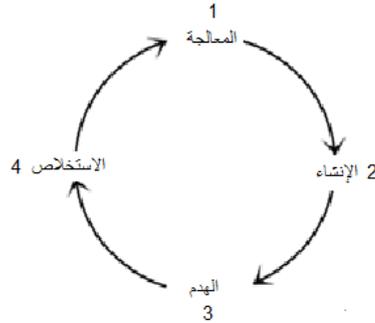
تتم إدارة نفايات الهدم والبناء بعدة طرق يوضحها الشكل (1-2) وهي: الطمر (Land fill) من خلال دفن النفايات وتعتبر طريقة بدائية، يليها إعادة استخدام المنتج (Reuse) سواء لنفس الغرض أو لأغراض أخرى دون الحاجة إلى عملية إعادة تصنيع الأمر الذي يوفر صرف طاقة إضافية، ويأتي بعدها إعادة التدوير موضوع البحث (Recycle) وأخيراً التقليل (Reduction) الذي يعتمد على تقليل كمية حطام الإنشاءات والهدم التي تتولد من المصدر وذلك بواسطة الاهتمام بتقدير كمية المواد الخام التي نحتاجها.



الشكل (21-) الخيارات الخاصة بمخلفات الهدم والبناء (Paul, 2011)

تتضمن طريقة إعادة التدوير معالجة وإعادة التصنيع لنفايات الهدم والبناء وذلك بإعادتها إلى دورتها الحياتية الموضحة ب. Error! Reference source not found. (3) وجعلها مادة صالحة للاستعمال لنفس الغرض أو في أغراض أخرى. وهذه الطريقة مفيدة بيئياً لعدة أسباب منها تقليل حجم النفايات المتولدة وبالتالي توفير مساحة الأرض المستغلة كمكب

للنفايات وأيضاً مفيدة لأنها تعمل على توفير المصادر الطبيعية الأصلية وبالتالي ديمومة هذه المصادر والتقليل من حجم التدهور البيئي.



الشكل (31-) دورة حياة مواد الإنشاء (paul, 2011)

هناك استخدامات شائعة للركام المعاد تدويره في العناصر الغير حاملة وغيرها مثل:

- ◆ الركام الناتج عن إعادة تدوير مخلفات الطرق يستخدم في الخلطات الإسفلتية الجديدة، أو كطبقة تكسية مؤقتة لمواقف السيارات والساحات المكشوفة للحد من تطاير الأتربة.
- ◆ الركام المعاد تدويره ذو النوعية الجيدة يستخدم في:
 - حجارة البناء كالبلوك والطوب.
 - الأجزاء الغير إنشائية كالجران.
 - حجارة الرصف سواء البلوك المستخدم في مد الرصيف أو الحجارة الجانبية التي توضع على طرف الرصيف.
 - تمهيد الطرق الفرعية وممرات المشاة.
 - فرش وإملاء المناطق المحيطة بالأنايبب الموضوعة في خنادق ضمن الأرض.
 - تحسين التربة ومكافحة التآكل وفي أعمال الردم.
 - من أجل الخرسانة الإنشائية منخفضة المقاومة.

2.1 مشكلة البحث وأهميته :

Problem and Importance of this Research

يتطلب الوضع في سوريا عملاً جاداً وسريعاً حتى يتم إدارة الكم الكبير من النفايات التي نشأت خلال الظروف الصعبة التي مرت بها معظم المناطق، ونتج عنها تهديم لعدد كبير من المباني، وأفضل الطرق لعلاج هذا الوضع هو إعادة تدوير النفايات ومنها النفايات الخرسانية. ومن أجل ذلك تم في هذا البحث العمل على أحد المحاور الهامة التي يجب أن تكون عنها فكرة واضحة في حال الرغبة في الاستفادة بالشكل الأمثل من هذه النفايات، هذا المحور يدور حول دراسة الخصائص الميكانيكية للخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره تجريبياً وتحليلياً.

يعتبر الركام أحد المكونات الرئيسية للخرسانة وله دور كبير في تحديد خصائص الخرسانة المنتجة منه، وفي حال الحاجة لاستخلاص الركام من النفايات الخرسانية وإعادة استخدامه من جديد لا بد من معرفة أثره على مختلف الخصائص كمقاومة الضغط (Compressive Strength) والشد (Tensile Strength) وعلى معامل المرونة (Elastic Modulus) وأيضاً أثره على سلوك العناصر الإنشائية (Structural Element) كالجوائز الخاضعة لانعطاف.

3.1 الهدف من البحث :

Objective of this research

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير الركام الخشن المعاد تدويره كبديل جزئي أو كلي عن الركام الخشن الطبيعي على الخصائص الميكانيكية للخرسانة المنتجة منه مع وبدون الإضافات البوزولانية (البوزولانا الطبيعية). بالإضافة إلى دراسة إمكانية استخدام هذه المادة الجديدة في الجوائز المسلحة المعرضة للانعطاف.

4.1 طرائق البحث :

Methods of Research

تم في هذا البحث إجراء دراسة تجريبية على عينات من ركام معاد تدويره لتحديد أثره على الخصائص الميكانيكية المختلفة للخرسانة المنتجة منه. كما أجريت دراسة عددية باستخدام طريقة العناصر المحدودة (Finite Element Method, FEM) بواسطة البرنامج الإنشائي (ABAQUS, V6.12) لجوائز من الخرسانة المسلحة استخدم فيها الركام المعاد تدويره، حيث تم إجراء تحليل عددي لا خطي يأخذ بعين الاعتبار تأثير لا خطية المادة (Material Non-Linearity, MNL) وأخذ أثر التماسك (Bond) بين الخرسانة وفولاذ التسليح بعين الاعتبار.

5.1 محتويات الأطروحة:

Research Outline

تم تقسيم الأطروحة إلى ثمانية فصول:

الفصل الأول: يتناول نظرة عامة ومقدمة عن البحث بالإضافة إلى مشكلة البحث والهدف منه وطرائق البحث المتبعة فيه ومحتويات هذه الأطروحة.

الفصل الثاني: يستعرض معلومات عامة عن إعادة التدوير عالمياً وعربياً كما يستعرض فوائد هذه العملية و معوقاتها ويوضح الآلية التي تتم بها عملية إعادة التدوير.

الفصل الثالث: يتناول المراجعة البحثية لعدد من الدراسات السابقة حول الركام المعاد تدويره وأثر استخدامه على الخصائص الميكانيكية كونه موضوع البحث، وكذلك أثر الإضافات البوزولانية على الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره

كونها شائعة الاستخدام معها، مع لمحة عن البوزولانا الطبيعية في القطر العربي السوري كونها اعتمدت كإضافة في هذا البحث.

الفصل الرابع: يتضمن توضيح لخصائص المواد الداخلة في خلطات البحث ومكونات الخلطات مع توضيح للاختبارات التي تم إجراؤها ضمن العمل التجريبي والعينات المحضرة لذلك.

الفصل الخامس: يحتوي هذا الفصل على نتائج العمل التجريبي في هذه الدراسة فيما يتعلق بالخصائص الميكانيكية المختلفة كمقاومة على الضغط والشد، معامل المرونة وأيضاً تصرف الجوائز المسلحة على الانعطاف وذلك من أجل خرسانة منتجة من ركام معاد تدويره بدون بوزولانا أو مع بوزولانا كبديل و كإضافة من وزن الاسمنت على الخلطة.

الفصل السادس: تم في هذا الفصل الوصول لعلاقة تجريبية لحساب معامل المرونة لخرسانة منتجة من ركام معاد تدويره وتم التحقق من صحة العلاقة ومقارنتها مع أبحاث تجريبية أخرى أعطت علاقات مختلفة.

الفصل السابع: يتضمن هذا الفصل كل ما يتعلق بالتحليل الإنشائي الذي تم في هذا البحث للجوائز الخرسانية المسلحة باستخدام طريقة العناصر المحدودة (FEM) من حيث توصيف العناصر وأبعادها وشروط الاستناد والأحمال المطبقة ونوع التحليل المستخدم. ومن حيث توصيف المواد الداخلة في التحليل وكيفية الربط بينها لتحقيق التماسك. كما يحتوي هذا الفصل عملية التحقق من النموذج المعتمد بمقارنته مع النتائج التجريبية لهذه الدراسة. ويأتي في نهاية هذا الفصل نتائج الدراسة التحليلية لجوائز مسلحة خاضعة للانعطاف من أجل نسب تسليح مختلفة تحقق أنماط مختلفة للانهياب.

الفصل الثامن: يتضمن تلخيصاً للنتائج التي تم الوصول إليها في الفصول السابقة، بالإضافة إلى التوصيات الضرورية لتلافي نواقص البحث ولتطوير العمل والأبحاث المستقبلية في هذا المجال.

الفصل الثاني

معلومات عامة عن إعادة تدوير الخرسانة *General Aspects Of Recycling Concrete*

1.2 مقدمة:

Introduction

يتضمن هذا الفصل لمحة عن إعادة تدوير نفايات الهدم وبشكل خاص النفايات الخرسانية دولياً وعربياً، كما يحتوي هذا الفصل الفوائد التي يمكن الحصول عليها من تحويل هذه النفايات إلى ركام يعاد استخدامه من جديد، بعدها تم التطرق إلى العوائق التي تحول دون انتشار هذه الأمور بالشكل المطلوب، أخيراً شُرحت خطوات الحصول على الركام المعاد تدويره والمتبعة في وحدات إعادة التدوير.

2.2 إعادة تدوير نفايات الهدم والبناء في العالم: *Recycling C&DW in the world*

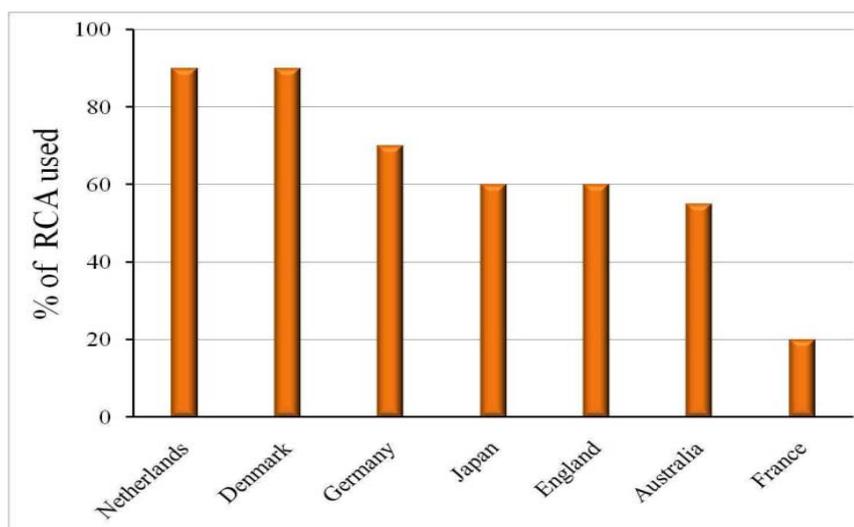
ظهرت فكرة إعادة تدوير النفايات بشكل مباشر بعد الحرب العالمية الثانية وأول من نشر أبحاث في هذا المجال العالم الروسي Gluthge في عام 1946، تلاه الباحث Ploger في عام 1947 الذي قدّم أطروحة في جامعة كورنيل تدرس إمكانية استخدام الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره (Recycled Aggregate Concrete, RAC)، وفي ألمانيا وخلال 1948 أجرى Otto Graf تجارب على الخرسانة المكسرة لإنتاج خرسانة جديدة (Paul, 2011).

زاد البحالات اهتمام ث حول المسائل المتعلقة بـ RAC بشكل ملحوظ في منتصف السبعينيات وذلك لأن اعتماد هذا النوع من الخرسانة أصبح الحل للمشاكل التي ظهرت نتيجة المتطلبات البيئية والقيود الصارمة عند التخلص من النفايات، لذلك بدأت أغلب البلدان المتقدمة بالتسابق في تدوير النفايات لأنها تنبعت إلى أهمية ذلك وضرورته. وتعتبر نيوزلاند والدنمارك رائدة بهذا المجال وذلك بحسب إحصائية قدمها (Tam et al, 2008) مدرجة في الجدول (1-2). إحصائية أخرى قدمها (Paul, 2011) موضحة في الشكل (1-2) فيها نسبة النفايات الخرسانية التي يعاد تدويرها في بعض الدول .

وفيميللي توضيح مبسط عن عملية تدوير C&DW في بعض البلدان تم أخذ معظم البيانات فيها من الدراسة المرجعية للباحث (Paul, 2011):

الجدول (1-2) نسبة نفايات المباني بالمقارنة مع مجمل النفايات ونسبة نفايات الهدم التي يعاد تدويرها (Tam et al, 2008)

| Country | Proportion of construction waste to total waste (%) | C&D waste recycled (%) |
|--------------------------|---|------------------------|
| Australia | 44 | 51 |
| Brazil | 15 | 8 |
| Denmark | 25-50 | 80 |
| Finland | 14 | 40 |
| France | 25 | 20-30 |
| Germany | 19 | 40 to 60 |
| Hong Kong | 38 | No information |
| Japan | 36 | 65 |
| Italy | 30 | 10 |
| Netherlands | 26 | 75 |
| Norway | 30 | 7 |
| Spain | 70 | 17 |
| United Kingdom | Over 50 | 40 |
| United States of America | 29 | 25 |



الشكل (12-) نسبة النفايات الخرسانية التي يعاد تدويرها في بعض الدول (Paul, 2011)

1-2-2 الولايات المتحدة الأمريكية: United American States, USA

يظهر من الجدول (1-2) أنه يتم تدوير 25% من النفايات الخرسانية في الولايات المتحدة الأمريكية، يستخدم الركام المعاد تدويره بشكل أساسي في المطارات والشوارع، حيث بحسب تقديرات صادرة عن (The American Concrete Pavement Association, ACPA) فإن 200 مليون ميل يتم إعادة تدويرها سنويا وكل ميل يتطلب حوالي 6000 طن من الخرسانة المكسرة وبالتالي يتم استهلاك ما يقارب 1.2 مليون طن من الركام المعاد تدويره .

تستخدم معظم الولايات في أمريكا الركام المعاد تدويره لعمل الطبقات السفلية من الطرق (Road base)، حيث يشكل هذا الاستخدام 68% من مجمل مجالات الاستخدامات الأخرى، وبحسب إحصاءات سابقة فإن نسبة 85% من الركام المستخدم في ذلك مصدره تدوير الخرسانة (Crawford and Cullum, 2001).

2-2-2 اليابان: Japan

اهتمت دولة اليابان بكل قطاعاتها منذ السبعينيات بموضوع إعادة تدوير النفايات وقدمت تقارير وأبحاث كثيرة حوله ووضعت قوانين للحث على استخدام الركام المعاد تدويره منذ عام 1992م، حيث تم رعاية برنامج لإعادة تدوير مخلفات الهدم واعتبارها منتجات ثانوية تدخل في الصناعات الجديدة، وفي عام 1994 تم وضع "مواصفات الجودة أولية لإعادة استخدام مواد من هدم الخرسانة لأعمال الإنشاءات" (Tentative Quality Specifications for Reusing Materials from Demolished Concrete for Construction Works)، وبحسب الشكل (1-2) فإنه يتم تدوير ما يقارب 60 % من C&DW ويستخدم في مجالات كثيرة أهمها في إنشاء الطرق.

3-2-2 المملكة المتحدة: United Kingdom, UK

يتم تدوير حوالي 60% من نفايات الهدم في المملكة المتحدة الشكل (1-2)، الأمر الذي قلص الأراضي اللازمة لإلقاء النفايات وقلل من الحاجة إلى استخدام المواد الطبيعية في البناء الجديد. وتستخدم RA في إنشاء الأرصفة (Pavement construction)، تطوير البنية التحتية (Infrastructure developments) وفي مشاريع البناء حيث تم في عام 1996 إنشاء مبنى بعدة طوابق استخدم فيه هذا الركام لتحضير 1500م3 من الخرسانة لصب العمدة، الأساسات والبلاطات وسمي بالبناء الأخضر كناية لكونه صديق للبيئة الشكل (2-2).

اعتُبر RA في عام 2001 المصدر الخامس للركام في UK، ويتوقع زيادة نسبة استخدامه في السنوات المقبلة. وفي مايو من نفس العام سمحت وكالة الطرق السريعة في المملكة المتحدة باستخدام RA باعتبارها ركام ثانوي في إنشاء أكثر الطرق السريعة وقامت بإصدار تعديلات على "مواصفات RA لتشغيل الطريق السريع" (RA Specification for Highway Works)، أما في عام 2004 في مطار هيثرو في المحطة رقم 5، تم استخدام 100 ألف طن تقريباً من RA.



الشكل (2-2) البناء الأخضر في بريطانيا (Paul, 2011)

4-2-2 الاتحاد الأوروبي: *European Union*

أنشأت الدول الأعضاء في الاتحاد الأوروبي كألمانيا وهولندا والدنمارك وغيرهم سياسات وبرامج لإعادة تدوير بين 50% إلى 90% من C&DW، وذلك لتحل محل الموارد الطبيعية مثل الصلب والخشب والمواد المستخرجة من المقالع. حيث وُجد أن تكلفة المواد المعاد تدويرها أقل من تكلفة المواد الطبيعية، وإعادة تدويرها أقل تكلفة من التخلص منها. يُظهر الشكل (2-1) النسب العالية التي يتم تدويرها من C&DW في بعض هذه البلدان ومنها ألمانيا التي تعتبر من الدول الرائدة في هذا المجال، ففي عام 1997 تم استخدام 480 م³ من RA في إنشاء مبنى موضح بالشكل (2-3) حيث استُخدم مواد معاد تدويرها لعناصر إنشائية (Structural elements) وللعزل الحراري (Thermal insulation) وفي بلاط الأرضيات (Floor tiles).



الشكل (32-) مبنى في ألمانيا تم إنشاؤه باستخدام RA (Paul, 2011)

5-2-2 هونغ كونغ: *Hong Kong*

ينتج في هونغ كونغ كل عام حوالي 14 مليون طن من C&DW القسم الأكبر منه كان يستخدم في إصلاح الأراضي (Land reclamation)، ولكن في عام 2002 أسست الحكومة منشأة لإعادة تدوير C&DW بطاقة إنتاجية تصل حتى 2400 طن كل يوم من RA لتستخدم في معظم المشاريع التي تنفذها الحكومة، وكجزء من التدابير لمراقبة جودة المنتج تؤخذ العينات من أجل الاختبار يوميا ويتم فحصها وتحديد الملوثات فيها، وقد أنتجت هذه المنشأة 240 طن من جودة عالية. وفي نهاية أكتوبر 2003، تم استهلاك ما يقارب 22700 م³ من RA في 10 مشاريع لتنفيذ قيعات الأوتاد المسلحة (Reinforced pile caps)، بلاطات أرضية (Ground slabs)، جوائز (Beams)، جدران استنادية (Retaining walls) وأيضا في الخرسانة الكتلية (Mass Concrete).

3.2 إعادة تدوير نفايات الهدم والبناء في الدول العربية: *Recycling C&DW in Arabic Countries*

تعتبر النفايات أحد التحديات الهامة التي تواجه الدول العربية في الوقت الحاضر. ومن الملاحظ زيادة كميات النفايات وذلك لعدة أسباب كالزيادة السكانية وظهور أنماط وسلوكيات معيشية جديدة والسير نحو التحضر. وتشير الإحصاءات بحسب

(مركز البيئة للمدن العربية، 2013) إلى ارتفاع كمية النفايات في البلدان النامية من حوالي 300 مليون طن في عام 1990 إلى حوالي 580 مليون طن في عام 2005. وتختلف كمية ونوعية وطرق معالجة النفايات بين الدول العربية وتم التركيز فيما يلي على موضوع نفايات الهدم والبناء وكيفية تعامل بعض الدول العربية معها:

1-3-2 دولة الكويت: *Kuwait*

تعتبر دولة الكويت سباقة في هذا المجال على مستوى المنطقة العربية، وبذلت ولا تزال جهوداً كبيرة لتدوير النفايات، حيث يقدر متوسط النفايات الناتجة عن عمليات الهدم من 18 إلى 20 ألف طن يومياً، وبغية استثمارها والاستفادة منها تم افتتاح وتشغيل مشروع لمعالجة النفايات الإنشائية في العام 2004 وهناك نيّة لإنشاء ثلاث مصانع جديدة (المستقبل، 2013).

2-3-2 الإمارات العربية المتحدة: *United Arab Emirates*

تظهر التقديرات الحالية بحسب (الرفاعي، 2010) أن النفايات في أبوظبي تشكل 75% من مخلفات الهدم والبناء، بينما باقي النفايات والتي تمثل 25% ناتجة عن مخلفات طبية وزراعية وباقي المخلفات الأخرى، وحتى يتم التخلص من هذه النفايات بشكل يضمن المحافظة على البيئة والاستفادة منها بشكل إيجابي، تم في أبو ظبي في عام 2010 م افتتاح مصنع الطفرة لإعادة تدوير مخلفات الهدم والبناء ليكون بداية لسلسلة مصانع من هذا النوع. يمتلك هذا المصنع تكنولوجيا متطورة بطاقة إنتاجية تبلغ 5000 طن يومياً من الركام والذي يتم الحصول عليه من خلال تقطيت وفرز مخلفات البناء وتحويلها إلى 4 أنواع من الركام يمكن الاستفادة منه في عمليات البناء بأسعار مخفضة.

يوجد في دبي أيضاً شركات ومصانع تُعنى بالمحافظة على الموارد الطبيعية والتخلص من النفايات الإنشائية، حيث يوجد في ضواحيها مصنع الإمارات لإعادة التدوير، وتجري بلدية دبي فحوصات مخبرية على الركام المعاد تدويره الناتج للتأكد من أنه مطابقاً للمواصفات القياسية العالمية.

3-3-2 المملكة العربية السعودية: *Saudi Arabia*

تعاني مدن المملكة العربية السعودية تداعيات ظاهرة انتشار مخلفات البناء والهدم والطرق والمخلفات الإنشائية بالتزامن مع التسارع الملاحظ في عدد السكان والتصاعد في نسبة الاحتياجات من المباني والمنشآت والمشاريع الاستثمارية والسكنية، وبحسب بيانات قدمها (جاروشة، 2013) أوضح خبراء متخصصون في النفايات الصلبة في عام 2013 م أن البيئة السعودية تشهد زيادة في معدلات توليد النفايات حيث تم تقدير حجمها بنحو 17 مليون طن سنوياً، أما حجم المخلفات الإنشائية فقدرت بنحو 45% من المجموع الكلي للمخلفات. لذلك يتم السعي حالياً إلى إيجاد حل بيئي مستدام ومناسب من الناحية الاقتصادية من أجل أن تتحول المدن السعودية إلى مدن خضراء تلتزم بالمعايير العالمية للمحافظة على البيئة.

4-3-2 مصر:***Egypt***

لا توجد حتى الآن سياسة واضحة أو خطوات حقيقية في مجال تدوير نفايات الهدم والبناء، وهناك معاناة وشكاوي كثيرة من قبل السكان بسبب انتشار نفايات الهدم بمدخل ومخارج المحافظات وداخل الكتل السكنية، وبحسب (محمد، 2011) درست شركة المقاولون العرب في 2011م مشروعا يقضي برفع مخلفات المباني ومعالجتها كيميائيا وإعادة استخدامها في المباني. كما تدرس شراء مخلفات الهدم والبناء من المواطنين والقيام بإعادة تدويرها لإنتاج نوع جديد من الطوب شديد الصلابة.

5-3-2 سوريا:***Syria***

تعاني سوريا صعوبات كثيرة في تطبيق سياسات فعّالة في إدارة النفايات الصلبة لعدة أسباب منها تقنية واقتصادية وتشريعية وثقافية اجتماعية حالها حال أغلب الدول النامية.

يجعل الظرف الراهن الذي تعيشه سوريا من الصعوبة الحصول على معلومات دقيقة حول كميات ونوعية مخلفات الهدم في المحافظات، تشير المعلومات المتوفرة إلى أن الطرق المتبعة لإدارة مخلفات الهدم والبناء هي طرق بدائية لا ترتقي إلى الطرق العلمية الحديثة في التعامل مع تلك المخلفات، حيث يعتمد الطمر الصحي لتلك النفايات كطريقة رئيسية في التخلص منها إضافة إلى هامش بسيط من إعادة تدوير أو إعادة استخدام لتلك المخلفات.

جاء في تقرير نشرته (سيرياستيس، 2011) أن 40% من النفايات البلدية يجري التخلص منها في مطامر صحية، لكنها تفتقر للإشراف الكفاء والتشغيل الجيد. بالمقابل يتم التخلص من القسم الأكبر من النفايات وبما يعادل تقريبا 55% في مكبات عشوائية تنتشر على أطراف المدن والقرى مسببة التلوث البصري .

في مواجهة هذا الواقع، اقترحت وزارة الدولة لشؤون البيئة تنفيذ الإستراتيجية الخاصة في إدارة النفايات، وتطبيق القوانين الخاصة بها، واستخدام تقنيات متطورة في جمع النفايات ونقلها والتخلص منها. كما حثت على رفع مستوى الوعي البيئي في ما يتعلق بإدارة النفايات الصلبة، وإشراك القطاع الخاص. وحضت على تبني مبدأ تدوير النفايات والاستفادة منها، والعمل على تجهيز منشآت لمعالجة النفايات الصناعية مع مراعاة إنشائها قرب التجمعات الصناعية كي تتوافق طرق التخلص منها مع معطيات البيئة وغيرها.

هنا تظهر أهمية هذا البحث الذي قد يكون خطوة مساعدة في مجال تدوير نفايات الهدم والبناء حتى يتم مواكبة الدول المتطورة التي تمكنت من الاعتماد على هذا المورد في تنفيذ مشاريعها الإنشائية بشكل كامل أو بشكل جزئي.

4.2 فوائد إعادة تدوير مخلفات الهدم والبناء: *Benefits Of Recycling C&DW*

جرت العادة على أن تطمر أغلب مخلفات البناء إلى مواقع دفن المخلفات، ينتج عن هذا تكاليف بيئية واقتصادية كبيرة، وبالتالي فإن عملية إعادة تدوير C&DW تفيد في أمور بيئية، واقتصادية حيث أن استخدامها يمكن أن يوفر المال والطاقة، ويحافظ على موارد المواد المستخدمة، كما ويطيل من عمر القدرة المحدودة لمواقع دفن المخلفات (Paul, 2011; Kou, 2005; Abukersh, 2009):

1. توفير الموارد الجديدة والحفاظ على الموارد الطبيعية الثمينة وبالتالي تحقيق مبدأ التنمية المستدامة.
2. الحد من التلوث البيئي الناتج عن هدم المباني القديمة نظراً لعدم وجود وسائل معالجة متخصصة للنفايات الناتجة، والاكتفاء بدفنها أو تكديسها، الأمر الذي سبب تلوث خطير للبيئة وطبقات المياه الجوفية بالمدينة.
3. توفير المال للحكومات والمشاريع التجارية، حيث أن الموارد الجديدة كالرمال والصخور والحصى نقل بشكل متطرد؛ ومع هذا الإمداد القليل يأتي ارتفاع في تكاليف استخراج ومعالجة ونقل المواد الخام التي تستخدم لأول مرة والتي يتم استجراؤها من أماكن بعيدة. بالمقابل فإن تكاليف شراء المواد المعاد تدويرها أقل من شراء مواد تستخدم لأول مرة.
4. تساعد عملية إعادة تدوير مخلفات الهدم والبناء في الموقع على التقليل من تكاليف نقل المادة وتكاليف التخلص منها، حيث شيئاً فشيئاً تبتعد المناطق التي يتم فيها دفن المخلفات عن المدينة، وتزداد تكاليف جمع المخلفات ونقلها والتخلص منها في النهاية.
5. تقليل الكلف المدفوعة لمدافن النفايات والتي أصبحت كضرائب يجب دفعها في بعض البلدان.
6. يساهم جمع المواد من مواقع البناء بانتظام وإعادة تدويرها المواقع أكثر نظافة ويزيد من كفاءة العمل والسلامة.
7. تقلل عملية إعادة تدوير مخلفات الهدم والبناء المصروفات المالية وكمية المواد التي يتطلب التخلص منها ويصبح بالإمكان إعادة تدوير النفايات الأخرى كالخشب والألمنيوم والمعادن الأخرى، الإسفلت والألواح الكارتونية .
8. تسهيل إدارة مواقع دفن المخلفات من خلال إعادة تدوير مخلفات الهدم والبناء حتى لا يحدث أي تأثير عكسي على المياه الجوفية أو إصابة المناطق المحيطة بتلوث خطير بسبب المخلفات الأخرى.
9. الاستخدام الأمثل للأراضي، فمع التوسع العمراني السريع في أغلب المدن لا بد من ترشيد استخدام المساحة التي تحتاجها مواقع دفن المخلفات، وبالتالي يمكن استخدام الأرض بشكل أكثر فعالية. إن هذا الأمر يتحقق عندما يعاد تدوير النفايات وبالتالي تنقل المساحات التي تشغلها المدافن والمكبات وتزداد المساحة الخضراء والمستثمرة بشكل صحيح في حال تم السعي لذلك من قبل أشخاص واعيين بيئياً.
10. تحفز زيادة الطلب على المخلفات الخرسانية على تحويل مناطق الردم القديمة إلى مراكز ووحدات لإعادة تدوير المخلفات الخرسانية فيها، وذلك من شأنه المساعدة على إعادة تأهيل هذه المناطق.

11. توفير فرص عمل واستثمار من خلال إنشاء مصانع إعادة تدوير المخلفات الخرسانية، حيث أن مشروع إعادة التدوير قائم على الأيدي العاملة في مجال فرز كل نوع من النفايات على حدة، مما يؤمن فرص عمل جديدة للشباب والشابات وبالتالي التقليل من مستويات البطالة، بالإضافة إلى أن المشروع يقوم على زيادة نشر الوعي البيئي لدى الأفراد حول ضرورة التطبيق الفعلي لإعادة التدوير مما يستدعي ضرورة وجود طاقم للقيام بحملات التوعية البيئية.

12. بالإضافة إلى أثر استخدام مخلفات الهدم والبناء المعاد تدويرها في الحد من التكاليف المتعلقة بإدارة تلوث الهواء والماء، و الطاقة اللازمة لذلك.

5.2 معوقات إعادة تدوير نفايات الهدم والبناء: *Obstacles of Recycling C&DW*

لا تنحصر مشكلة نفايات الهدم والبناء على بلد معين دون الآخر، بل تخص جميع دول العالم وتعتبر مشكلة عالمية، ويمكن القول بأنه لا يوجد بلد في عالم اليوم بمنجى من هذه المعضلة التي يؤخر إيجاد حلول مناسبة لها معوقات عدّة منها (Paul, 2011; Abukersh, 2009; Kou, 2005):

- 1- **عدم وجود مرافق إعادة التدوير في الموقع المناسب:** يجعل نقل النفايات عبر مسافات كبيرة استخدام C&DW غير اقتصادي ويشكل عائقا رئيسيا في مجال إعادة تدوير C&DW. عندما تكون النفايات بكميات صغيرة في مواقع العمل، تظهر الحاجة للآليات المتنقلة التي يمكن جلبها واستخدامها على مقربة من موقع الهدم، وبالتالي يمكن لذلك المساعدة في خفض التكاليف وتقليص الحواجز التي تحول دون إعادة التدوير بشكل مناسب.
- 2- **غياب التكنولوجيا المناسبة:** إن التكنولوجيا المجدية تجاريا لإعادة التدوير غير متوفرة في كثير من البلدان، وبالأخص البلدان النامية إن الأساليب التي يمكن استخدامها لسحق C&DW لا تحقق النفع التجاري المطلوب. إضافة لغياب قضايا أخرى مثل مراقبة جودة المواد الخام والمنتج النهائي، الخ.
- 3- **نقص الوعي تجاه إمكانيات إعادة التدوير والآثار البيئية المترتبة على ذلك:** إنه من الضروري خلق الوعي البيئي ونشر المعلومات المتعلقة بإعادة التدوير وتوضيح خصائص الخرسانة المصنوعة من RA لتغيير موقف المستهلكين وزيادة الثقة تدريجيا بخيار إعادة التدوير. كما يجب خلق سوق للمنتجات المعاد تدويرها وإشراك صنّاع البناء والتشييد فيها وتشجيعهم على استخدام المواد المعاد تدويرها في مختلف المشاريع.
- 4- **عدم وجود معايير واضحة:** لا تتوفر المواصفات والمعايير المتعلقة باستخدام RA كما هو الحال من أجل NA في العديد من البلدان. المثبت حتى الآن استخدام الخرسانة مع 100٪ من الركام الخشن المعاد تدويره في التطبيقات التي تتطلب مقاومة أقل من 20 N/mm²، ولكن للتطبيقات التي تتطلب مقاومة أعلى من 35 N/mm² يسمح بنسبة 20٪ من RA وذلك في حال التطبيقات العامة وليس في الهياكل التي وظيفتها الاحتفاظ بالماء. إن من الضروري تطوير المعايير ذات الصلة والمواصفات المتعلقة باستخدام C&DW في البناء الجديد لتقديمها للمنتجين ومنح المستخدمين وسائل التأكد من نوعية المواد.

- 5- **قلة الدعم الحكومي:** لنجاح صناعة إعادة التدوير لابد من الدعم المناسب من الحكومة بمختلف قطاعاتها وتوجيه التخطيط الاستراتيجي الهادف إلى مواكبة طموح وتطلعات الفرد والمجتمع في مجال المحافظة على البيئة والموارد الطبيعية، وحتى يتوفر المناخ الصحي البيئي الآمن للتنمية المستدامة يقترح إجراء الأمور التالية:
- * تشجيع البحث العلمي في هذا المجال في مجال إعادة تدوير الخرسانة الناتجة من مخلفات الهدم حتى يتم التوصل إلى المواصفات والمقاييس التي يتم وفقها استخدام أو عدم استخدام مخلفات الهدم .
 - * رعاية مؤتمرات ومعارض للنفايات تُعقد سنوياً، يكون للبلديات دور في دعم الجهود لإنجاح هذا الحدث، وجعله يستقطب عدد كبير من المسؤولين في الوزارات الحكومية والمؤسسات التي تهتم بالمسؤولية الاجتماعية تجاه البيئة، إضافة إلى الشركات المحلية والعالمية، التي تقدم تكنولوجيا حديثة ومتطورة من أجهزة ومعدات لتجميع ومعالجة وإدارة النفايات وصناعة إعادة تدوير النفايات. وكذلك استغلال هذه المعارض في توعية المواطنين والوافدين بضرورة تقبل فكرة فصل النفايات بهدف خلق بيئة صحية نظيفة وموارد مستدامة.
 - * إعطاء العاملين أو المهتمين في مجال البناء والإنشاء توعية ومعرفة بموضوع التنمية المستدامة وعلاقته مع إدارة المواد الإنشائية.
 - * التركيز على تفعيل "الجانب التدريبي" للمقاولين وشركات البناء وكوادرها البشرية في طرق التعامل مع المخلفات والنفايات الإنشائية، وكذلك الإعداد والتهيئة لإعادة التدوير والاستخدام.
 - * تشجيع المبادرات العملية في تناول واستخدام المشاريع والمواد والمنتجات الصديقة للبيئة.
 - * تفعيل طرق وآلية عمل الإدارات المسؤولة عن الرقابة والمتابعة الدورية للمخالفات غير الحضارية مع الرصد المباشر للمخالفين والأدوات الجزائية المناسبة.
 - * الربط الإداري بين ترخيص وتأهيل جميع المنظومات العاملة في البناء والإنشاء من جهة ومدى التزامها وتطبيقها للمعايير المهنية في هذا الخصوص.
 - * تخصيص مواقع ومساحات بصفة رسمية، مختارة ومناسبة من الجوانب البيئية والصحية والجمالية في كل حي أو منطقة سكنية لاستقبال هذه المخلفات الإنشائية، بحيث يتم التعامل المباشر معها والتخلص منها من خلال الأدوات العلمية المناسبة وبوجود خط إنتاج متكامل والذي توضحه الفقرة التالية.

6.2 عملية إعادة تدوير نفايات الهدم والبناء: *Processing Of C&DW*

إنّ عملية إعادة تدوير الركام من الخرسانة هي عملية بسيطة نسبياً وهي مماثلة لعملية الحصول على الركام الطبيعي. حيث تنطوي على كسر الخرسانة وإزالة المواد الغير مرغوب بها ومن ثم سحقها إلى الحجم المطلوب وبجودة تلبى متطلبات محددة. تعتبر عملية الفصل بين مختلف أنواع النفايات في موقع الهدم أو في مكب النفايات (Landfill) عملية ضرورية لضمان النوعية الجيدة قبل النقل إلى وحدة إعادة التدوير (Recycling Facility).

يجب الإشارة إلى أن نسبة النفايات الخرسانية تختلف باختلاف نوع المكب، الجدول (2-2) يبين نسب كل نوع من النفايات بحسب نوع الموقع، ولكن يُلاحظ على الرغم من اختلاف نوع المكب تبقى النفايات الخرسانية هي الأعلى فعلى سبيل

المثال من أجل موقع لأعمال الترميم (Renovation work) كانت نسبة النفايات الخرسانية 70% في حين أن باقي النفايات لم تتجاوز 10%. تعتبر عملية أخذ عينات من المكب وتحديد خصائصها مؤشراً لجودة الركام الناتج من استخدام نفايات هذا المكب وبالتالي معرفة التطبيقات التي يمكن أن يستخدم بها (Tam et al, 2008).

الجدول (2-2) نسب كل نوع من النفايات بحسب نوع الموقع (Tam et al, 2008).

| Waste type | Percentage | | | |
|-------------|-------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | Construction site | Demolition site | General civil work | Renovation work |
| Metal | 4 | 5 | 10 | 5 |
| Wood | 5 | 7 | 0 | 5 |
| Plastic | 2 | 3 | 0 | 5 |
| Paper | 2 | 2 | 0 | 1 |
| Concrete | 75 | 70 | 40 | 70 |
| Rock/Rubble | 2 | 1 | 5 | 0 |
| Sand/Soil | 5 | 0 | 40 | 0 |
| Glass/Tile | 3 | 2 | 0 | 10 |
| Others | 2 | 10 | 5 | 4 |
| Total | 100 | 100 | 100 | 100 |

هنالك ثلاث طرق في حقل الإنشاء يمكن للمقاولين من خلالها إعادة تدوير المخلفات وهي كالتالي (Abukersh, 2009):

- 1- جمع المواد المخلوطة: المواد التي بالإمكان إعادة تدويرها تنقل ككل من موقع العمل، ومن ثم تفصل حسب نظافتها وترسل إلى عمليات إعادة التدوير.
- 2- فصل عند المصدر: المواد نفسها تفصل عن المخلفات الأخرى في موقع العمل وحسب نوعيتها (مثل: الخشب، المعادن، الخرسانة) وترسل إلى وحدات إعادة التدوير.
- 3- التصنيع في الموقع: يتم تصنيع المواد القابلة لإعادة التدوير في موقع العمل بواسطة آليات متنقلة فتكون جاهزة لإعادة الاستخدام. حيث يوجد اليوم شركات قادرة على تصميم محطة تكسير متنقلة ذات سمات خاصة أو تعديلها وفقاً للحاجة وطلب المقاول أو الزبون، لتلبية متطلبات تكسير مخلفات الهدم لأكبر درجة الشكل (2-4).

تتطلب الطريقة الأولى والثانية النقل بشاحنات أو حاويات ذات سعة كبيرة إلى وحدات إعادة التدوير التي تقع عادة على هامش المناطق السكنية في المدن كما يظهر في الشكل (2-5) لتجنب تلوث الهواء الناجم خلال عملية إعادة التدوير وأيضاً إبعاد الضوضاء الناتجة عن المعدات وكوسيلة للتخفيف منها تزود الآلات المستخدمة في إعادة التدوير بكواتم للصوت فعالة للحد من الضوضاء المصاحب لعملية إعادة التدوير.



الشكل (42-) محطات تكسير متنقلة تستخدم في الموقع (Abukersh, 2009)



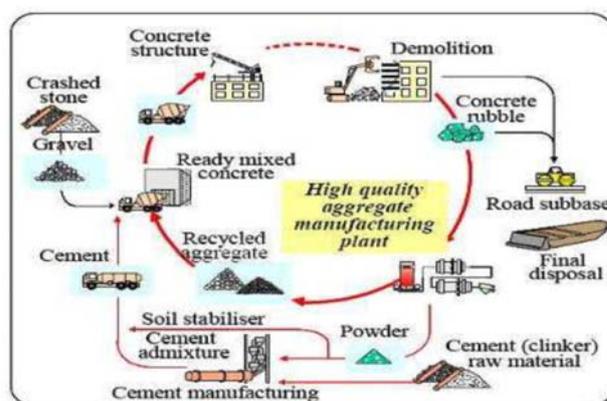
الشكل (52-) وحدة إعادة التدوير (Abukersh, 2009)

تتم عملية نقل الحطام (Transporting) إلى وحدة إعادة التدوير حيث يخضع هناك لعملية السحق والتكسير (Crushing)، ومن ثم يتم تمرير مخلفات البناء في معدات خاصة لإزالة الحديد وغيرها من المواد وذلك وفق أحد الطرق التالية (Abukersh, 2009) :

- الفصل الكهرومغناطيسي (Magnetic separation): ينطوي على إزالة حديد التسليح من قبل المغناطيس التي يتم تركيبها عبر الأحزمة الناقلة في الكسارات الابتدائية والثانوية.
- الفصل الجاف (Dry Removal): هو إزالة الجزيئات الأخف وزنا من المواد الحجرية من خلال تيار هوائي (Air-Sifting) هذا الأسلوب يؤدي دائما الكثير من الغبار.
- الفصل الرطب (Wet Removal): ويتم الفصل من خلال إزالة الملوثات منخفضة الكثافة بواسطة المياه وينتج عن هذه الطريقة ركام نظيف جدا.

لا توجد حتى الآن طريقة محددة لإعادة تدوير نفايات الهدم والبناء وتختلف طريقة الحصول عليه من بلد إلى آخر، فمثلاً في اليابان تم إيجاد تكنولوجيا متطورة تمكّن من الحصول على ركام معاد تدويره من النفايات الخرسانية بنوعية جيدة ليستخدّم في تحضير خلطات خرسانية جديدة وحتى الاسمنت الناتج يتم إعادة تدويره وإعادة استخدامه كما هو واضح في الشكل (2-6).

تحتوي وحدة إعادة تدوير نفايات الهدم والبناء بشكل أساسي كما يظهر من الشكل (2-7) على آليات فرز (sorting)، آليات تكسير للمرحلة الأولية وللمرحلة الثانوية (Primary and Secondary Crushing)، وسائل إزالة الشوائب (Impurity removal)، آليات نقل المواد ضمن الوحدة كالمشاحنات أو جرارات ... الخ (removal services) آليات تفرز الناتج النهائي حسب الطلب وعلى شكل كومات (Stockpiles) وأخيراً أماكن تخزين هذا الناتج (storage areas).



الشكل (62-) نظام إعادة تدوير الخرسانة المتبع في اليابان (Paul, 2011)



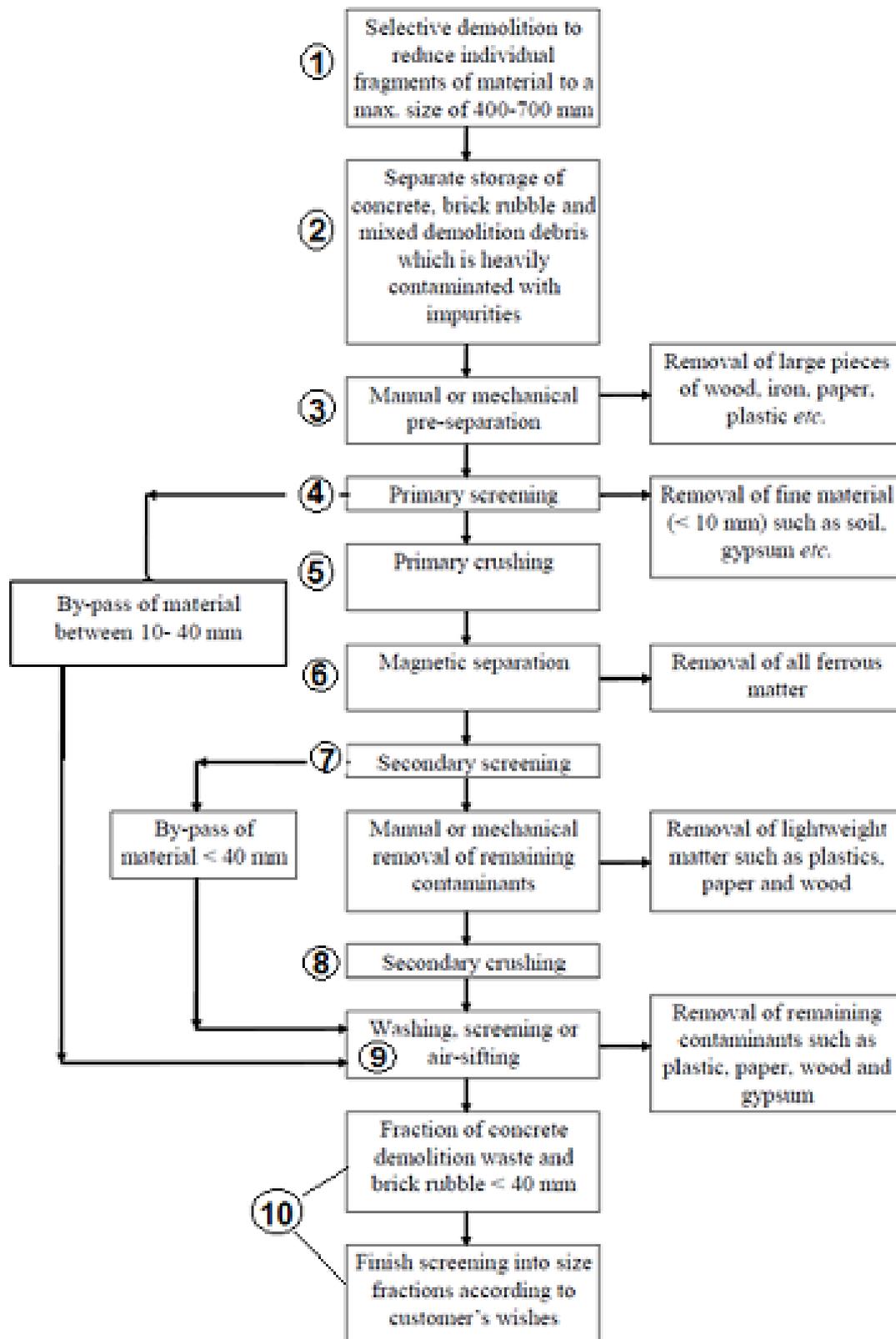
الشكل (72-) أقسام وحدة إعادة تدوير نفايات الهدم والبناء (Abukersh, 2009)

إن الخطوات المتبعة في وحدات إعادة التدوير والتي يظهرها المخطط التدفقي في الشكل (2-8) هي كالتالي :

- 1- تجرى عملية تقليص أولية (Primary Reduce) بأخذ أجزاء من نفايات الهدم يتراوح حجمها بين 400-700مم.
- 2- تفصل النفايات وتصنّف إلى نفايات خرسانية، نفايات من الطوب (brick rubble) وحطام (debris) يحوي شوائب (Impurities) بنسبة عالية .
- 3- يتم اعتماد الطرق الميكانيكية أو اليدوية (Manual or mechanical pre-separation) لإزالة المواد الغير مرغوب فيها كالخشب، الحديد، الورق، البلاستيك... الخ.
- 4- تتم عملية فرز أولية (Primary screening) يتم فيها التخلص من الجزيئات لناعمة ذات حجم أصغر من 10مم والتي تكون بالغالب تربة، جبس... الخ وتجمّع الجزيئات التي حجمها بين 10-40 مم لتعالج حسب البند 8.
- 5- الأجزاء التي حجمها أكبر من 40 مم تتابع مسيرها في خط الإنتاج ليجرى لها عملية تكسير أولية (Primary crushing).
- 6- تستخدم المغناطيسية بعملية الفصل المغناطيسي (Magnetic separation) لجذب كل الشوائب الحديدية التي تجمع ليتم إعادة تدويرها أيضاً.
- 7- تجرى عملية فرز ثانوية (Secondary screening) يتم فيها ما يتم في عملية الفرز الأولية.
- 8- يتعرض الركام المتبقي عن عملية الفرز الثانية إلى عملية تكسير ثانوية (Secondary crushing) ينتج عنها جزيئات بحجم 10-40 مم.
- 9- يتم تجميع نواتج عمليات الفرز السابقة ليتم غسلها (Washing screening) أو تعريضها لتيار (Air- sifting) للتخلص من أغلب الشوائب العالقة بجزيئات الركام شكل (2-9)
- 10- أخيراً تتم عملية فرز نهائية (Finish screening) للركام الناتج عن تدوير الخرسانة أو الطوب من خلال آلات تفصل الناتج إلى كومات بأحجام مختلفة تتدرج من 40 حتى 10مم ليتم تلبية رغبة الزبون.

يجدر التنويه أن الماء المستخدم في غسل الركام للتخلص من الشوائب يتم تجميعه في برك ليتم معالجته وإعادة تدويره وضخه إلى خزانات ليصبح جاهزاً للاستعمال مرة أخرى.

واللافت للذكر أنه في ظل الاهتمام الكبير من قبل الدول المتقدمة بمسألة إعادة التدوير، فإن بعضها قد صنّعت روبوتات تعمل على إعادة تدوير الخرسانة بالموقع بحيث تتخلص من مشكلة الشوائب التي قد تختلط بها ومن عملية إزالة الحديد وغيره من نفايات البناء (الشكل 2-10) (Robotics, 2014).



الشكل (82-) الخطوات المتبعة في وحدات إعادة التدوير (Abukersh, 2009)



الشكل (92-) إزالة الشوائب العالقة بالركام بواسطة الغسل بالماء (Abukersh, 2009)



الشكل (102-) روبوتات لإعادة تدوير الخرسانة بشكل مباشر (Robotics, 2014).

7.2 الخلاصة:

أخذت مشكلة نفايات الهدم والبناء طابعاً عالمياً، وأصبحت مشكلة جلية وواضحة للعيان في جميع دول العالم سواء كانت هذه الدول نامية أو من الدول المتقدمة صناعياً. يجب أن تكفل إدارة هذه النفايات حماية عناصر البيئة وأن تتوافق مع مبدأ التنمية المستدامة حتى نحصل على النفع البيئي والاجتماعي والاقتصادي معاً، ولن يتم ذلك إلا بحل شامل يتم فيه النهوض بواقع إدارة نفايات الهدم والبناء من خلال الوقوف عند المعوقات واقتراح الحلول المناسبة لحلها، وإيجاد خطة إستراتيجية لسنوات مستقبلية عدة ترسم نهجاً لحل جميع المشاكل الخاصة بهذا المجال.

الفصل الثالث

المراجعة البحثية *Literature Review*

1.3 مقدمة

Introduction

يتناول هذا الفصل المراجعة البحثية لبعض الأدبيات العلمية التي أجريت حول الركام المعاد تدويره والخرسانة المنتجة منه، حيث تم التركيز على ما له علاقة بهذا البحث كالدراسات المرجعية التي ناقشت خصائص الركام المعاد تدويره من الخرسانة والتصنيفات والاشتراطات الخاصة به، والدراسات التي ناقشت الخصائص المختلفة للخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره مما له علاقة بهذه الدراسة، أيضاً تم التطرق في سياق هذا الفصل لبعض المواضيع التي تهم البحث كالديمومة والإضافات المستخدمة مع الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره. وفي نهاية الفصل تم استعراض الجديد في هذه الأطروحة والذي يختلف عما ورد في الدراسات المرجعية.

2.3 خصائص الركام المعاد تدويره من تكسير الخرسانة:

Properties of Recycled Aggregate Obtained from Crushed Concrete

غيرت المونة القديمة العالقة على سطح الركام المعاد تدويره¹ (Recycled Agregate, RA) الكثير من مواصفاته وجعلت الخواص الفيزيائية أو الميكانيكية أو الكيميائية مختلفة عن الركام الطبيعي² (Natural aggregate, NA)، وفيما يلي بعض النقاط الهامة والتي يظهر فيها الاختلاف بشكل جلي (Kou,2005):

- **الشكل الخارجي (Outside Shape):** إن الركام المعاد تدويره له شكل الركام الطبيعي ولكن لجزيئاته سطح أخشن وزوايا أكثر وتكون متطاولة بشكل أكبر، هذه العوامل تجعل الامتصاص للماء أكثر، وتشغيل الخرسانة المنتجة منه أقل.

- **الكثافة (Density):** كثافة الركام المعاد تدويره أقل من كثافة الركام الطبيعي والسبب الرئيسي لذلك هو المونة القديمة (Old Mortar) الملاصقة لسطح الركام الأصل ويؤثر على قيمة الكثافة لحالة ركام مشبع السطح (Saturated Surface Density, SSD) عوامل عدة مثل:

¹ إن الركام المعاد تدويره من الخرسانة والذي تتم الإشارة إليه في هذا الفصل والفصول التي تليه هو الركام الخشن واعتمد الرمز RA للدلالة عليه.
² اعتمد الرمز NA لهذا الفصل والفصول التالية للدلالة على الركام الطبيعي الخشن.

- المونة الملاصقة (Adhered Mortar): كلما كانت كمية المونة الملاصقة أكثر كلما كان كثافة الركام المعاد تدويره أقل.
- مقاومة الخرسانة الأصل (Strength of original concrete): تزداد كثافة الركام المعاد تدويره كلما ازدادت مقاومة الخرسانة المأخوذ منها من أجل نفس كمية المونة القديمة الملاصقة.
- حجم الركام (Aggregate Size): كلما كان حجم الركام أقل كلما كانت قيمة الكثافة أقل، وبالتالي فإن لجودة التكسير والآلات والطاقة المستخدمة تأثير على كثافة الركام بشكل كبير.
- **الامتصاص (Absorption):** تعتبر هذه الخاصية من أهم أوجه الاختلاف بين الركام المعاد تدويره والركام الطبيعي ويلاحظ أن:
 - كلما كان حجم الركام أصغر كلما كانت قدرة الامتصاص أكبر.
 - كلما كانت كمية المونة القديمة الملتصقة أكثر كلما كانت قدرة الامتصاص أكبر.
 - كلما كانت الكثافة أقل كلما كان الامتصاص أكبر.
 - ليس لمقاومة الخرسانة الأصل التي تم تكسيرها تأثير على امتصاص الركام الناتج.
- **فاقد الاهتراء (Abrasion Loss):** أظهرت الدراسات أن قيمة الفاقد في اختبار لوس انجلوس تزداد كلما كان حجم الركام أصغر وكلما كانت مقاومة الخرسانة الأصل أقل. يظهر الجدول (1-3) قيم الفاقد من أجل عدد من الدراسات. وعلى سبيل المثال يتضح من النتائج الخاصة بـ (Hansen & Natud, 1983) أن الفاقد يزداد كلما قل حجم RA، حيث 22.4% للحبات ذات الحجم 16-32 mm وصولاً إلى 30.1% للحبات ذات الحجم 4-8 mm.

الجدول (1-3) قيم الفاقد في اختبار لوس انجلوس من أجل أحجام مختلفة (Kou, 2005)

| | Recycled aggregates in abrasion according to several investigators | | | | | |
|--------------------------------------|--|---------|----------|---------------|------------------------------|------------------|
| | Hansen and Narud (1983) | | | Hasaba (1981) | Japanese Investigator (1978) | Yoshikane (2000) |
| Size Fraction | 4-8 mm | 8-16 mm | 16-32 mm | 5-25 mm | (*) | 5-13 mm |
| Los Angeles Abrasion Loss Percentage | 30.1 | 26.7 | 22.4 | 23.0 | 25.1-35.1 | 20.1 |

(*) For recycled aggregate, according to 15 different concretes crushed by different way.

- **الشوائب (Impurities):** تعتبر الشوائب أحد مساوئ الركام المعاد تدويره والتي تؤثر سلباً على مقاومة وديمومة الخرسانة المنتجة منه، وقد أوردت بعض الكودات ومنها الكود البريطاني جداول حدّدت فيها المتطلبات اللازم تحقّقها حتى يمكن استخدام الركام المعاد تدويره، كما يوضح جدول (2-3) والتي أوردها (Abukersh, 2009)، ولكل نوع من الشوائب حد خاص بها، فعلى سبيل المثال يجب أن لا تتجاوز نسبة المواد الغريبة (Foreign material) كالخشب والمعادن والبلاستيك 1% من الوزن.

الجدول (2-3) متطلبات الركام المعاد تدويره حسب (BS 8500-2:2002)، (Abukersh, 2009)

| Property | Percentage (by mass) |
|--|----------------------|
| Maximum masonry content | 10.0 |
| Maximum fines content | 3.0 |
| Maximum lightweight materials content (density < 1000 kg/m ³) | 1.0 |
| Maximum asphalt content | 10.0 |
| Maximum other foreign materials (e.g. glass, wood plastics, metals etc.) | 1.0 |
| Maximum acid-soluble sulphates SO ₃ | 1.0 |

أولى الباحثون هذا الموضوع الكثير من الاهتمام وسعوا من خلال دراساتهم إلى وضع حدود مسموحة للشوائب والمواد الضارة الممكن تواجدها في هذا الركام، وكمثال على ذلك التوصيات التي قَدّمها (Crawford and Cullum, 2001) بخصوص الشوائب كالإسفلت والخشب والزجاج .. الخ، والتي تتعلق بمجال استخدام الخرسانة، كما يوضح الجدول (3-3)، أيضاً اقترح (Okionomou, 2005) حدود لكمية الشوائب وذلك للعناصر الكيميائية الضارة كالزنك Zn والرصاص Pb وغيرها (الجدول 3-4).

الجدول (3-3) الحدود العليا المسموح بها للشوائب (Crawford and Cullum, 2001)

| | Use in concrete as coarse aggregate | Use in road construction-unbound/cement-bound material | Hardcore, fill or granular drainage material |
|--|--|--|--|
| Asphalt and Tar (as lumps, e.g., road planings, sealants) | Included in limit for other foreign material | 10% in RCA (I)2 or 5% in RCA (II)2 or 10% in RCA (III)2 | 10% |
| Wood (includes other materials less dense than water) | 1% in RCA (I) or 0.5% in RCA (II) or 2.5% in RCA (III)3 | Sub-base Type 1 & 2: 1% or CBM (1-5): 2%, and capping layer 2% | 2% |
| Glass | Included in limit for other foreign material | Content above 5% to be documented | Content above 5% to be documented |
| Other Foreign Material (e.g., metals, plastic, clay lumps) | 5% in RCA (I) or 1% in RCA (II) or 5% in RCA (III)3 | 1% (by volume if ultra-lightweight) | 1% (by volume if ultra-lightweight) |
| Sulphates | Concrete and CBM: 1% acid-soluble SO ₃ . Unbound material | | |

هذا وقد ذهب بعض الباحثين إلى ضرورة إزالة الشوائب قبل التكسير و بعد التكسير عندما يتحرك الركام على شبك أمّلس، وذلك إما يدوياً أو باستخدام آلات مساعدة كالمغناطيس (Fong et al, 2002)، وجدير بالذكر أن إزالة هذه المواد وفصلها قبل عملية التكسير يقلل من كمية الشوائب وتأثيرها الضار، حيث أوضح (Kou, 2005) أن وجود جبصين (Plaster)

بنسبة 3% في الركام المعاد تدويره يخفض المقاومة بمقدار 15%، وفي حال كانت الخرسانة معرضة لبيئة رطبة يصبح مقدار الانخفاض حتى 50%.

الجدول (3-4) الحدود العليا للعناصر الكيميائية الضارة (Okionomou, 2005)

| Element-substance | Limit ($\mu\text{g/l}$) |
|-------------------|---------------------------|
| As (زرنيخ) | 50 |
| Pb (رصاص) | 100 |
| Cd (كاديوم) | 5 |
| Cr (كروم) | 100 |
| Cu (نحاس) | 200 |
| Ni (نيكل) | 100 |
| I (يود) | 2 |
| Zn (زنك) | 400 |

3.3 تصنيف الركام المعاد تدويره:

Classification Of Recycled Aggregates

يتوفر حاليا في بعض البلدان تصنيفات للركام المعاد تدويره تم الوصول لها بعد سنوات طويلة من البحث. وحتى يتوفر معلومات مساعدة للمهندسين والمصممين حول هذه المادة تم فيما يلي عرض بعض التصنيفات لـ RA وما تضمنته من اشتراطات بحسب بعض الكودات وأيضا وفق لنتائج قدمها بعض الباحثين.

- أحد التصنيفات هي حسب معايير ألمانية (Dutch Standard NEN 5950,1995) مبينة في الجدول (3-5) حيث تم تقسيم الركام المعاد تدويره إلى ثلاثة أصناف مختلفة هي (III,II,I) (Paul, 2011).

- I. ركام معاد تدويره من الخرسانة: يجب أن تكون أكثر من 90% من النفايات عبارة عن خرسانة وركام طبيعي الكثافة الجافة لها أكبر من 2000 Kg/m^3 وبفاقد اهتراء أقل من 40%، وعلى سبيل المثال يجب أن لا تتجاوز نسبة الإسفلت 1% من الوزن.
- II. ركام معاد تدويره من الخرسانة وطوب البناء: تختلف عن سابقتها بأن نسبة الخرسانة في والركام الطبيعي الخليط يجب أن لا تقل عن 70% وفاقدا الاهتراء لا يتجاوز 50%، أما الكثافة فيجب أن لا تقل هنا أيضا عن 2000 Kg/m^3 .
- III. ركام معاد تدويره من طوب البناء: يستخدم بإنتاج الخرسانة الخفيفة وعند استخدام 10% منه لا حاجة لأي حسابات إضافية. نسبة الخرسانة والركام الطبيعي في الخليط أقل من 20% من الوزن الكلي.

الجدول (5-3) التصنيفات هي حسب معايير ألمانية (Dutch Standard NEN 5950,1995) (Paul, 2011).

| Constituents (% by mass) | I | II | III |
|---|--------|--------|--------|
| Concrete and natural aggregates acc. to DIN 4226-1 | ≥ 90 | ≥ 70 | ≤ 20 |
| Clinker, no porous clay bricks | ≤ 10 | ≤ 30 | ≥ 80 |
| Calcium silicate bricks | | | ≤ 5 |
| Other mineral materials (i.e. porous brick, Light weight concrete, plaster, mortar, porous slag.) | ≤ 2 | ≤ 3 | ≤ 5 |
| Asphalt | ≤ 1 | ≤ 1 | ≤ 1 |
| Foreign substances (i.e. glass, plastic, metal, wood, paper, other.) | ≤ 0.2 | ≤ 0.5 | ≤ 0.5 |
| Oven dry density (kg/m ³) | ≥ 2000 | ≥ 2000 | ≥ 1800 |
| Maximum water absorption after 10 min (%) | 10 | 15 | 20 |

- تصنيفات واشتراطات أخرى قدمتها كودات أخرى ويوضحها الجدول (6-3) وهي الكود الصيني (DG/TJ07-008, (SCSS, 2007)) الذي يحوي صنفين الأول كثافته أعلى من 2400 Kg/m³ وثاني كثافته أعلى من 2000 Kg/m³. أما كلا الكودين البريطاني (BS8500, 2002) و الياباني (JIS TRA0006, 2000) فقدما صنفاً واحداً فقط، في حين تضمن التصنيف الذي قدمه الاتحاد الدولي لمخابر الأبحاث والاختبارات الخاصة بالمواد والإنشاءات (International union of Testing and Research. Laboratories for Materials and structures (RILEM), 1994) ثلاثة أنواع مقسمة بحسب مصدر الركام ومن أجل كل نوع تم ووضع اشتراطات تخص الكثافة والامتصاص ونسبة الشوائب المسموح بها (Paul, 2011):

(1) النوع الأول (Type 1) عبارة عن ركام معاد تدويره مصدره 100% من الطوب.

(2) النوع الثاني (Type 2) عبارة عن ركام معاد تدويره مصدره 100% من الخرسانة.

(3) النوع الثالث (Type 3) وهو خليط من الركام الطبيعي والركام المعاد تدويره.

- أيضاً في اليابان قدم (Koji, 2005) تصنيفاً اعتمد فيه المواصفات الفيزيائية للركام كالكثافة والامتصاص ونسبة المونة الملتصقة، وقسم الركام إلى نوع بجودة عالية Class H ونوع آخر بجودة منخفضة Class L وذلك بحسب ما يبين الجدول (7-3).

الجدول (6-3) تصنيفات واشتراطات حسب بعض الكودات العالمية (Paul, 2011)

| Items | DG/TJ07-008 | | RILEM | | | BS8500 | JIS TRA 0006 |
|---|-------------|---------|--------|---------|----------|--------|--------------|
| | Type I | Type II | Type I | Type II | Type III | | |
| SSD density (kg/m ³) | ≥2400 | ≥2200 | ≥1500 | ≥2000 | ≥2400 | - | - |
| Absorption (%) | ≤7 | ≤10 | ≤20 | ≤10 | ≤3 | - | ≤7 |
| Masonry content (%) | ≤5 | ≤10 | - | - | - | ≤5 | - |
| Crushing value (%) | ≤30 | | - | - | - | - | - |
| Soundness (mass loss %) | ≤18 | | - | - | - | - | - |
| Flakiness index (%) | ≤15 | | - | - | - | - | - |
| Clay content (%) | ≤4 | | - | - | - | - | - |
| Sulphate content SO ₃ (%) | ≤1.0 | | ≤1 | ≤1 | ≤1 | ≤1 | - |
| Chlorides content (%) | ≤0.25 | | - | - | - | - | - |
| Organic material (%) | ≤0.5 | | ≤1 | ≤0.5 | ≤0.5 | - | - |
| Fine particle (%) | - | - | ≤3 | ≤2 | ≤2 | ≤5 | ≤2 |
| Material with SSD < density 2200 kg/m ³ | - | - | - | ≤10 | ≤10 | - | - |
| Material with SSD < density 1800 kg/m ³ | - | - | ≤10 | ≤1 | ≤1 | - | - |
| Material with SSD < density 1000 kg/m ³ | - | - | ≤1 | ≤0.5 | ≤0.5 | ≤0.5 | - |
| Impurity content (%) (metal, glass, plastic, asphalt, wood) | ≤1 | | ≤5 | ≤1 | ≤1 | ≤1 | - |
| Asphalt content (%) | - | - | - | - | - | ≤5 | - |
| Metal content (%) | - | - | ≤1 | ≤1 | ≤1 | - | - |
| Sand content (< 4mm) (%) | - | - | ≤5 | ≤5 | ≤5 | - | - |

الجدول (7-3) متطلبات الخواص الفيزيائية للركام المعاد تدويره حسب (Koji, 2005)

| Type | Class H | Class L |
|-------------------------|--------------------|--------------------|
| Aggregate Size (mm) | not more than 25 | not more than 25 |
| Relative Density | not less than 2.51 | not less than 2.24 |
| Moisture Absorption (%) | not more than 2.77 | not more than 6.27 |
| Adhesive mortar (%) | not more than 23.2 | not more than 56.8 |

4.3 مقارنة بين الركام الطبيعي والركام المعاد تدويره Comparison Between NA & RA

هناك إجماع عام على أنّ كمية العجينة الأسمنتية لها تأثير كبير على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية للركام المعاد تدويره، وقيم هذه الخصائص مختلفة عن الركام الطبيعي، قدّم (Gomes, 2002) دراسة أدرج فيها مقارنة بين NA و RA وأوضح الفارق في القيم من أجل بعض الخصائص الفيزيائية الموضحة في الجدول (8-3) وهي الكثافة بالحالة الجافة (Dry Specific Density) وبالحالة المشبعة جافة السطح (Specific Density)، الامتصاص والمسامية (Porosity)، وعلى سبيل المثال تتراوح قيم الامتصاص من أجل NA من 0.88 حتى 1.13 في حين أن قيمه تكون بين 5.83 حتى 6.81 من أجل RA.

الجدول (8-3) مقارنة بين الخصائص الفيزيائية للركام الطبيعي والركام المعاد تدويره (Gomez 2002)

| Property | Unit | NA | RA |
|--------------------------------|-------------------|-------------|---------------|
| Dry specific density | kg/m ³ | 2570 – 2640 | 2260 – 2280 |
| Specific density (surface dry) | kg/m ³ | 2590 – 2670 | 2410 – 2420 |
| Water absorption | % | 0.88 – 1.13 | 5.83 – 6.81 |
| Total porosity | % | 2.70 – 2.82 | 13.42 – 14.86 |

5.3 خصائص الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره: Properties of Concrete Made of RA

تلعب الخواص الأساسية للركام دوراً كبيراً في تحديد نوعية الخرسانة. ولتصميم خرسانة بمواصفات جيدة من الركام الخشن المعاد تدويره يجب مراعاة شكله، ملمس سطحه، الكثافة، وامتصاص المياه، والمحتوى من الشوائب والمواد الضارة مثل الطمي والطين أو المواد العضوية بحيث لا تتجاوز ما ورد في التصنيفات والاشتراطات التي تم ذكرها آنفاً.

يتكوّن الركام المعاد تدويره RA من خليط من ركام طبيعي مغلف بالمونة الأسمنتية مع قطع من الركام الطبيعي أو قطع من الأسمنت فقط بالإضافة لبعض الشوائب. تحدّد مواصفات هذه المكونات لإضافة لتدرج الركام (Grading of aggregate) ما إذا كان الركام مناسب لإنتاج الخرسانة أم لا. حالياً هناك نسب معتمدة في كودات بعض الدول لـ RA تستخدم في الخلطة الخرسانية كبديل عن NA دون أي إجراءات إضافية وتتلخص كما يلي (Paul, 2011):

- في أمريكا (American National Ready Mix Concrete Association, NRMCA) تعتبر نسبة 10% من RA مناسبة حتى في الخرسانة الإنشائية (Structural concrete).
- في بريطانيا تعتبر 10% مقبولة من أجل مقاومات تصل إلى 65 MPa.
- في المواصفات الألمانية ((The Dutch standard VBT, (1995)) توصل الباحثين أن نسبة 20% من RA يمكن أن تستخدم وبدون الحاجة إلى أي اختبارات إضافية.
- أوضح الدليل الأسترالي (Australian guidelines) أنه يمكن رفع النسبة إلى 30% من RA بدون أن يلاحظ أي فرق قابلية التشغيل (Workability) والمقاومة بالمقارنة مع الخرسانة المنتجة من الركام الطبيعي.
- أفادت الدراسات السابقة إلى أنه يمكن استخدام نسبة حتى 100% من RA وذلك من أجل خرسانة مقاومتها المكعبية (cubic strength) لا تتجاوز 20 MPa .

يلعب الامتصاص العالي والكثافة المنخفضة نسبياً للركام المعاد تدويره الدور الأكبر في اختلاف خصائص الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره (Recycled Aggregate Concrete, RAC) عن الخرسانة التقليدية بركام طبيعي (Natural Aggregate Concrete, NAC)، وهذا الاختلاف يظهر في الخرسانة قبل وبعد التصلب بحسب نسبة الاستبدال* (Replacement Ratio) كما يلي:

3-5-1 الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره في الحالة الطازجة: Fresh Recycled Aggregate Concrete

هناك عدد من الأمور الواجب مراعاتها وأخذها بعين الاعتبار عند استعمال الركام المعاد تدويره في تحضير الخلطة الخرسانية نذكر منها:

- **تصميم الخلطة (Mix Design):** يتم اعتماد نفس المبادئ المتبعة في تصميم الخلطة الخرسانية لـ NAC، ويتم تحضير خلطات تجريبية (Trail Batch) بعد تحديد المكونات للتأكد من جودة الخلطة المصممة (Arundebet al, 2011)، ونتيجة التجربة يوصي الباحثين ومنهم (Kou, 2005) بعدة أمور ليتم الحصول على نتائج صحيحة وهي:

1. زيادة قيمة الانحراف المعياري (Standard Deviation) للحصول على المقاومة المطلوبة التي تحقق المقاومة المميزة المفترضة (Concrete Characteristic Strength).
2. تعديل نسبة الماء إلى الاسمنت (Water To cement Ratio, W/C) في حال أعطت الخلطة التجريبية مقاومة للضغط أدنى من المقاومة المطلوبة.

* يقصد بنسبة الاستبدال: نسبة الركام المعاد تدويره الخشن كبديل عن الركام الطبيعي الخشن في الخلطة الخرسانية والرقم الذي سيوضع خلف رمز الركام المعاد تدويره للدلالة على قيمة هذه النسبة مثلا RA50 تدل أنه تم استخدام 50% من الركام المعاد تدويره كبديل عن الركام الطبيعي.

3. يتم زيادة كمية الماء بمقدار 10 لتر/م³ وذلك للحصول على هبوط المخروط (Slump) المفترض في الخلطات مع ركام طبيعي.
4. في حال زيادة كمية الماء يجب زيادة كمية الاسمنت حتى نحافظ على نسبة الماء للاسمنت في الخلطة.
5. لابد من إجراء خلطة تجريبية قبل اعتماد الخلطة للتحقق من قابلية التشغيل (Workability) وملائمة W/C المختارة.

• **قابلية التشغيل (Workability):** تضاف كمية من الماء عند الخلط أكبر من كمية الماء المضافة لخرسانة NAC وذلك لتعويض الامتصاص العالي للركام الجاف المعاد تدويره مما يعطي قابلية التشغيل عند الخلط أفضل. ولكن سرعان ما تفقد الخلطة ذلك نتيجة امتصاص RAC السريع للماء وكلما كانت نسبة الاستبدال أكبر كلما كانت قيمة الهبوط أقل، وللتخلص من هذه الظاهرة يتم معالجة هذا النوع من الركام كما يعالج الركام الخفيف (Light weight aggregate) بنقع مسبق أو برشه بالماء ليتم ترطيبه (Vyas & Bhatt, 2013; Patil et al, 2013; Adnan et al, 2007).

تقدر كمية الماء الإضافية في الخلطات الخرسانية المنتجة من ركام معاد تدويره حسب بعض الدراسات (Kou, 2005) بـ 5% عن ما هي عليه في الخلطة بركام طبيعي، وحسب بعضها الآخر (Abukersh, 2009) تقدر بـ 8-10%.

• **كثافة الخرسانة (Concrete Density):** أظهرت الدراسات أن كثافة الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره أقل من كثافة الخرسانة بركام طبيعي بـ 5-15%، ويعود ذلك لكون كثافة الركام المعاد تدويره أقل من الركام الطبيعي ولأن محتوى الهواء في RAC أعلى من محتوى الهواء في NAC (Park; 1999, Kou, 2005).

3-5-2 الخصائص الميكانيكية للخرسانة المتصلبة والمنتجة من ركام معاد تدويره: *Mechanical Properties of Harden Recycled Aggregate Concrete*

بحثت معظم الأبحاث السابقة بسلوك وأداء خرسانة RAC (Coarse recycled aggregate) التي تحوي على الركام الخشن المعاد تدويره، حيث أوصت أغلب الدراسات بعدم استخدام الركام الناعم المعاد تدويره (Fine recycled aggregate) بسبب امتصاصه عالي جداً للماء بنسبة 100%، وبينت هذه الدراسات إمكانية استخدامه بنسب استبدال منخفضة تتراوح بين 10 حتى 30% من الوزن الكلي للرمال (Kou, 2005; Kumutha & Vijai, 2010; Abukersh, 2009; Luís et al, 2004; Tsoumani et al, 2012; Levy & Helene, 2007).

تم فيما يلي التركيز على عرض نتائج أبحاث ناقشت النقاط التي تتم دراستها في هذا البحث وذلك من أجل خرسانة منتجة من ركام خشن مصدره خرسانة قديمة، ولن يتم التطرق للدراسات التي اعتمدت ركام معاد تدويره مصدره البلوك أو الأجر أو الطوب لعدم علاقتها بهذا البحث.

في البداية لا بد من الإشارة إلى وجود تباين في النتائج التي قدمها الباحثون بهذا الخصوص، سببه اختلاف مصدر الركام المعاد تدويره وأيضاً اختلاف نسبة الماء للاسمنت (Water to cement ratio, W/C) المستخدمة حيث يكون لجودة الركام تأثير واضح عندما تكون النسبة المعتمدة منخفضة، في حين يتضاءل هذا التأثير عندما تكون نسبة الماء للاسمنت مرتفعة (Kumutha & Vijai, 2010)، في الجدول (3-9) الذي قدمه (Paul, 2011) ملخص لنتائج عدد من الدراسات حول الخصائص الميكانيكية (Mechanical properties)، وما يمكن ملاحظته من خلال هذا الجدول التباين الكبير في النتائج بين باحث وآخر بسبب اختلاف مصدر الركام المستخدم وجودته وأيضاً نسبة الماء إلى الاسمنت وغيرها من العوامل المؤثرة على الخصائص الميكانيكية. وعلى سبيل المثال عندما يتم استخدام نسبة 100% من الركام المعاد تدويره في الخلطة الخرسانية فإن الانخفاض بالمقارنة مع NAC في مقاومة الضغط (Compressive Strength) تراوح تقريباً بين 5 وحتى 30%، أما مقاومة الانعطاف (Flexural Strength) فوصل الانخفاض فيها 45.45%، في حين أن معامل المرونة (Elastic Modulus) حصل فيه انخفاض حتى 45%. يستدعي هذا التباين في النتائج مزيداً من الأبحاث حتى يتم الحصول على قاعدة بيانات أكبر تمكّن من الوصول إلى توصيف مناسب لهذه المادة الجديدة.

وفيما يلي نتائج لبعض الدراسات التي تم الإطلاع عليها:

من المسلم به أنّ المونة القديمة الملتصقة بسطح الركام المعاد تدويره تؤثر بشكل كبير على خصائص الخرسانة وخاصة المقاومة والنفوذية (Permeability)، ولكن هذا التأثير يختلف بحسب نسبة استبدال الركام الطبيعي بالركام المعاد تدويره. أكّدت الأبحاث السابقة أن استخدام نسب استبدال منخفضة لا تتجاوز 30% لا يحدث تغييراً كبيراً في الخواص الميكانيكية كالضغط (Compression)، الشد (Tension)، القص (Shear)، التعب (Fatigue)، التماسك (Bond).... الخ (Limbachiya et al, 2004; Patil et al, 2013; Paul; 2011).

أيضاً في هذا السياق قام الباحثين (Dhir & Paine, 2007) في مشروع لصالح (Waste Resources Action Programme, Warp) في بريطانيا بدراسة نسبة الاستبدال الممكن استخدامها من أجل نوعيات مختلفة من RA. تم إنجاز 125 خلطة خرسانية استخدم فيها: ركام طبيعي، ثلاث أنواع من ركام معاد تدويره من تكسير خرسانة مخبرية، ثلاثة أنواع من بلوك تم تكسيه في المخبر، خليط من النوعين الأخيرين بنسب خلط مختلفة. تم إجراء العديد من التجارب وتحديد المقاومة المكعبية على الضغط، مقاومة الانعطاف، معامل المرونة، التقلص الجاف (Dry shrinkage)، معدل امتصاص السطح للخرسانة، التجمد والذوبان (Freezing and thawing)، هجوم الكبريت (Sulfate attack). أظهرت النتائج أنّ استخدام الركام المعاد تدويره بنسبة 20% من وزن الركام له تأثير طفيف جداً على RAC على الرغم من اختلاف المصدر، وكنتيجة لهذا البحث تم التأكيد على إمكانية استخدام RA أياً كان مصدره بنسبة استبدال 20%.

دراسة لـ (Corinaldesi, 2011) أجريت على السلوك الميكانيكي (مقاومة الضغط) والخواص المرنة (معامل المرونة) لـ RAC. مصدر الركام المعاد تدويره من وحدة إعادة تدوير في إيطاليا لمخلفات هدم المنشآت الخرسانية معالجة بشكل جيد. تم تحضير عدّة خلطات خرسانية باستخدام ركام طبيعي بشكل كامل أو باستخدام ركام خشن معاد تدويره بنسبة استبدال 30%. تم اعتماد W/C تتراوح بين 0.4-0.6. تم استخدام ملدن (Superplastisizer) بحيث يكون هبوط المخروط

بين 19-20 سم. أظهرت النتائج أنه يمكن الحصول على خرسانة إنشائية مقاومتها المكعبية تصل إلى 32Mpa ولكن بمعامل مرونة أخفض بحوالي 16%.

الجدول (9-3) ملخص لنتائج دراسات سابقة (Paul, 2011)

| Source(s) | Year | RCA replacement ratio | Compressive strength | Flexural strength | E-modulus |
|--------------------------|------|-----------------------|----------------------|--------------------|--------------|
| Fernando Branco | 2004 | 100% | Same | 45.45% lower | 13.58% lower |
| Bordelon <i>et al.</i> | 2009 | 100% | 10.9% lower (7days) | 8.3% lower (7days) | |
| Poon <i>et al.</i> | 2004 | 100% | 3.1% lower | | |
| | | 50% | 7.45% lower | | |
| | | 20% | 7% lower | | |
| Xiao <i>et al.</i> | 2005 | 100% | 25.63% lower | | 45% lower |
| | | 70% | 15.6% lower | | 42% lower |
| | | 50% | 21.28% lower | | 42% lower |
| | | 30% | 5.28% lower | | 40% lower |
| Mirjana <i>et al.</i> | 2010 | 100% | 5.1% higher | 3.7% lower | 18.14% lower |
| | | 50% | 4.1% higher | 5.5% higher | 3.3% lower |
| Folarin Olorunsogo | 1999 | 100% | 13.61% lower | Same | |
| | | 70% | 11.66% lower | 10.25% lower | |
| | | 50% | 6.66% lower | 23.08% lower | |
| | | 30% | 8.33% lower | Same | |
| Nishibayashi and Yamura | 1988 | 100% | 15% - 30% lower | | 15% lower |
| Yong and Teo | 2009 | 100% | 15.5% higher | 7.4% lower | |
| | | 50% | Same | 13.23% lower | |
| Gomez | 2002 | 100% | 11.53% lower | | 10.1% lower |
| | | 60% | 8.2% lower | | 10.44% lower |
| | | 30% | 5.1% lower | | 6.4% lower |
| | | 15% | 2.3% lower | | 2% lower |
| Limbachiya <i>et al.</i> | 2004 | 100% | 2.27% higher | 17.77% lower | 1.97% lower |
| | | 50% | 2.27% lower | 11.11% lower | Same |
| | | 30% | 2.27% lower | Same | 1.97% higher |

توصل الكثير من الباحثين منهم (Katz, 2003; Khalaf & Devenny, 2004; Xiao, 2005) إلى أن مقاومة الضغط ومعامل المرونة للخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره أخفض بالمقارنة مع قيمهما في الخرسانة مع ركام طبيعي NAC وخاصة عندما تكون نسبة الاستبدال للركام الطبيعي بالركام المعاد تدويره 100%، فعلى سبيل المثال (Bairagi &

(Kishore 1993) قدّمنا نتيجة تفيد بأنّ الانخفاض في مقاومة الضغط يصل حتى 40%، في حين أوضح (Xiao, 2005) أنّ مقدار الانخفاض في معامل المرونة يكون حوالي 45%.

أجرى (Rahal, 2007) دراسة تجريبية على الخواص الميكانيكية لـ RAC بالمقارنة مع NAC، القطر الأعظمي (Maximum size) للركام 19 مم، تم استخدام الركام الناعم الطبيعي والاسمنت البورتلاندي العادي OPC. تم تحضير خمس خلطات بمقاومة مطلوبة (Required strength) تتراوح بين 20 N/mm² حتى 50 N/mm²، تم استخدام الركام المعاد تدويره وهو في الحالة المشبعة جافة السطح SSD وذلك من أجل التخلص من مشكلة الامتصاص العالي له، تم الحصول على هبوط مخروط يتراوح بين 50 حتى 60 مم. أظهرت النتائج أنّ مقاومة الضغط لـ RAC حققت ما يقارب 90% من مقاومة الضغط لـ NAC وفيما يخص تطور المقاومة (Strength development) والديمومة (Durability) كانت النتائج متقاربة بين كلا الخرسانتين.

اعتمد (Katz, 2003) تكسير مكعبات بأعمار مختلفة للحصول على RA لإنتاج خلطات خرسانية بنسبة 100% من الركام المعاد تدويره للبحث في خصائصها. أظهرت النتائج أنّ جودة RAC أدنى من NAC حيث أن متوسط مقاومة الضغط كانت أخفض بـ 24%. لم يكن هناك فرق واضح في الخواص الأخرى كالمقاومة على الشد سواء بالفلق أو بالانعطاف، معدّل الامتصاص، النقل الجاف وعمق الكربنة (Carbonation depth). تم في هذه الدراسة أيضاً تحديد نسبة مقاومة الشد إلى مقاومة الضغط فكانت أخفض بـ 10-15% من القيمة الواجب تحقيقها وفق الكود الأمريكي ACI 363R.

بيّن (Etxeberria, 2007) أنّه من أجل نسبة استبدال كاملة للركام الطبيعي بالركام المعاد تدويره تكون مقاومة الضغط أخفض بـ 20-25% عن حالة الخرسانة التقليدية وكذلك فإنّ معامل المرونة يكون أخفض بحوالي 16%، في حين تم التأكيد في هذا البحث أن استخدام نسبة 25% من RA بدلاً عن الركام الطبيعي لا يؤدي إلى تغير يذكر على الخصائص الميكانيكية، كما أوضحت الدراسة أنه عند اعتماد نسبة استبدال تتراوح بين 50-100% فيجب أن تزداد كمية الاسمنت بنسبة 4-10% وتخفض نسبة w/c بمقدار 5-10%. أوضح الباحث أيضاً في هذه الدراسة أن مقاومة الشد لا تتأثر كثيراً عند استخدام RA في الخلطة الخرسانية.

في دراسة أجراها (Konin & Kouaido, 2011) على خلطات خرسانية من NAC وأخرى RAC مع نسبة استبدال 100% من ركام معاد تدويره مصدره النفايات الخرسانية، قام الباحث بدراسة أثر محتوى الاسمنت (Cement content) على مقاومة الضغط، حيث تم استخدام خمس كميات مختلفة للاسمنت (250 Kg/m³، 300 Kg/m³، 350 Kg/m³، 400 Kg/m³ و 450 Kg/m³). تم تعديل كمية الماء للحصول على هبوط مخروط 8 سم. أظهرت النتائج أن الفرق في المقاومة بين NAC و RAC يكون أقل عند استخدام كمية اسمنت أقل، فمن أجل محتوى اسمنت 250 Kg/m³ و 300 Kg/m³ كان التغير في المقاومة أقل من 5%، في حين أن التغير في مقاومة الضغط يصبح 8% عند استخدام كمية اسمنت أعلى من 300 Kg/m³. ولكن الجودة التي تم الحصول عليها مع كمية اسمنت أقل من 300 Kg/m³ ضعيفة، في حين أن استخدام محتوى اسمنت أعلى من ذلك حسن من جودة الخرسانة وأعطاه مواصفات أفضل.

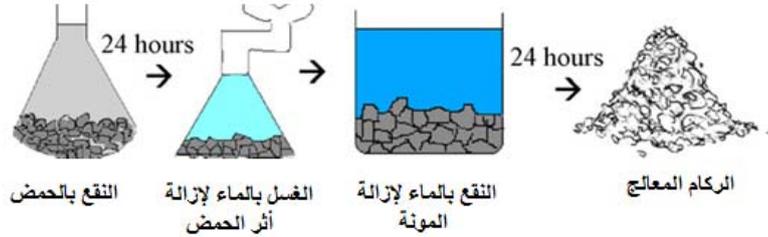
أجرى (Gonzalez & Martinez, 2005) بحث لدراسة الخرسانة الإنشائية (Structural Concrete) المنتجة من ركام معاد تدويره وركزت الدراسة على جانبيين الأول دراسة خصائص الركام المعاد تدويره والمطروح في السوق في اسبانيا، وتبين أنه على الرغم من الفرق الملحوظ في الكثافة وامتصاص الماء بين الركام الطبيعي والركام المعاد تدويره يبقى الأخير ملائم لصناعة خرسانة جديدة، الجانب الثاني الذي تم التركيز عليه في الدراسة الخصائص الأساسية للخرسانة، حيث تم تصميم خلطات NAC بحسب المواصفات الاسبانية مع $w/c \leq 0.55$ وكمية الاسمنت المضافة أكبر أو تساوي 300 Kg/m^3 من أجل الحصول على مقاومة $\leq 30 \text{ MPa}$. يتطلب الوصول لهذه المقاومة مع RA50 زيادة كمية الاسمنت بنسبة 6.2%. أظهرت النتائج بالاعتماد على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية (مقاومة الضغط، مقاومة الشد بالفلق، ومعامل المرونة) تقارباً مقبولاً بين NAC و RAC. كانت قيم مقاومة الضغط متقاربة جداً ولم تتأثر مقاومة الشد بالفلق (Splitting Tensile Strength) أما معامل المرونة فقد انخفض بمقدار 17.6% في اليوم 28.

أظهرت الدراسات ومنها (Akbari et al, 2011) أثر نسبة الركام المعاد تدويره – تم اعتماد تدويره نفايات المخبر - حيث أخذت نسب الاستبدال التالية (0%، 15%، 30%، 50%) مع نسب W/C (0.43-0.52-0.6)، وأظهرت النتائج أن المقومات تقل كلما زادت نسبة الركام المعاد تدويره، تم تسجيل انخفاض في المقومات يصل حتى (25%، 23%، 26%) في المقاومة على الضغط، الانعطاف والشد بالفلق على التوالي.

قام (Park, 1999) بدراسة أثر عمر الخرسانة المعاد تدويرها حيث اعتمد ركام مصدره خرسانة حديثة الصب تم تكسيها في اليوم 28 وركام مصدره نفايات خرسانية قديمة استخدم هذين النوعين في إنتاج خلطات خرسانية وتم مقارنة بعض المواصفات الميكانيكية لها مع خرسانة نموذجية منتجة من ركام طبيعي، في كل خلطة تم استخدام عيارين للاسمنت لدراسة أثر زيادة الاسمنت على المواصفات الميكانيكية 250 Kg/m^3 و 350 Kg/m^3 ، نسبة الماء للاسمنت تراوحت بين 0.53 وحتى 0.71 من أجل الحصول على هبوط مخروط يقع ضمن المجال 80-100 مم. أظهرت النتائج أن خرسانة RAC أضعف من الخرسانة NAC بغض النظر عن مصدر الركام، لكن أبدت الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره من خرسانة قديمة أداءً أفضل من الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره من خرسانة حديثة الصب حيث انخفضت مقاومة الضغط بمقدار 16% للقديمة و 25% لحديثة الصب بالمقارنة مع NAC، أيضاً بيّنت هذه الدراسة أن زيادة محتوى الاسمنت يحسّن من المواصفات ومنها المقاومة على الضغط، معامل المرونة النفاذية وغيرها.

كان هناك عدة محاولات (Tam et al, 2006; Murali et al, 2012) لتحسين أداء RAC من خلال معالجة الركام المعاد تدويره قبل استخدامه في الخلطة بالنقع المسبق (Pre-soaking treatment)، فقد بيّن (Tam et al, 2006) أن نقع الركام في الحموض الكيميائية كحمض كلور الماء وحمض الكبريت وحمض الفسفور بتركيز 0.1 مول وفق الخطوات الموضحة بالشكل (3-1) يؤدي إلى إزالة المونة الاسمنتية الملتصقة بالركام ويقل مقدار الامتصاص بنسبة تتراوح بين 7.27% حتى 12.17%، ويعطي ترابطاً أقوى في المنطقة الانتقالية بين الركام والمونة الاسمنتية. أظهرت النتائج أن المواصفات الميكانيكية للخلطة الخرسانية الناتجة عند استخدام نسب من الركام المعاد تدويره تتراوح بين 5-30% كبديل عن الركام الطبيعي أفضل من الخرسانة التقليدية المنتجة من الركام الطبيعي، فعلى سبيل المثال زادت قيمة معامل المرونة بمقدار 20.48% عندما

تم استخدام نسبة 30% من RA المعالج بحمض كلور الماء عوضاً عن الركام الطبيعي. تم التنويه في هذه الدراسة بأن المعالجة بالنقع المسبق للركام مجدية اقتصادياً حيث تكلفه 10 طن لا تتجاوز 500 دولار.



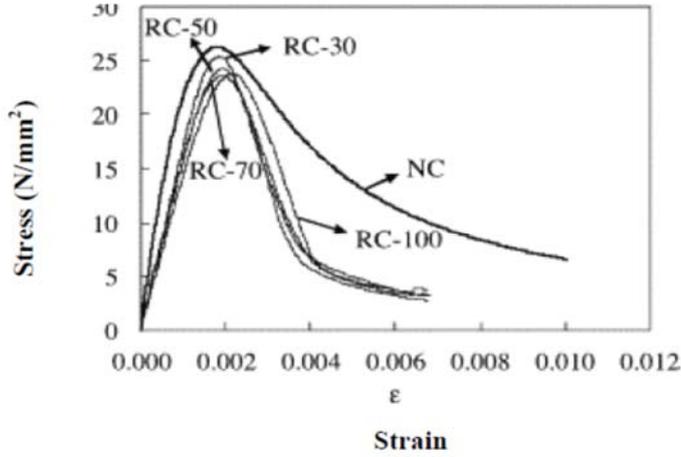
الشكل (13-) خطوات المعالجة بالنقع للركام المعاد تدويره حسب (Tam et al, 2006)

وفي نفس السياق أجرى (Murali et al, 2012) دراسة تم فيها استخدام الاسمنت البوزولاني لدراسة أثر نقع RA بالماء وأيضا بمحاليل كيميائية هي نترات الهيدروجين، حمض الكبريت، وحمض الكلور وذلك لمدة 24 ساعة. أظهرت النتائج أنّ هذا الإجراء يحسّن المقاومة على الضغط، الانعطاف والشد بالفلق بالمقارنة مع RAC بركام معاد تدويره بدون معالجة. بينت النتائج زيادة مقاومة الضغط بمقدار (4.93%، 11.88%، 5.38%، 7.17%) عند النقع بالماء، نترات الهيدروجين، حمض الكبريت وحمض كلور الماء على التوالي، أي أن استخدام نترات الهيدروجين كانت له الفاعلية الأكبر في تحسين هذه المواصفات الميكانيكية.

3-5-3 علاقة إجهاد تشوه في الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره: *Stress- Strain Curve of RAC*

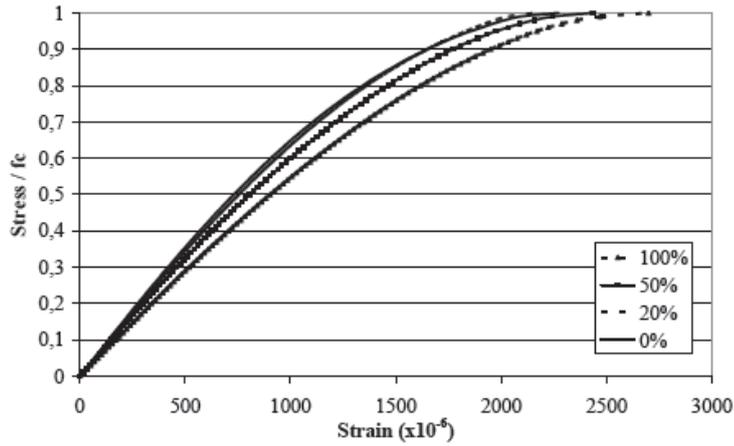
هناك عدد من الباحثين اهتموا بإيجاد منحنى إجهاد - تشوه لـ RAC (Stress- strain curve) ومنهم (Xiao et al, 2005) الذي أجرى دراسة على تأثير نسبة RA على مقاومة الضغط ومعامل المرونة وشكل الانهيار لـ RAC وذلك من أجل نسب الاستبدال التالية (30%، 50%، 70%، 100%) (الشكل 3-2)، وتوصل إلى أن مقدار الانخفاض في معامل المرونة يكون حوالي 45%. أما بالنسبة لعلاقة تشوه- إجهاد في RAC فقد أوضح الباحث أنها لا تختلف عما هي عليه في NAC سوى أنّه في RAC يصبح مقدار ميلان المنحنى بعد الوصول للإجهاد الأعظمي أكثر انحدراً وأخفض، وأما التشوه النسبي الأعظمي (Ultimate peak strain) والمقابل للإجهاد الأعظمي (Ultimate peak stress) فيزداد مع زيادة نسبة الاستبدال. وتوصل Xiao إلى أنه من أجل نسبة استبدال 100% كانت زيادة التشوه النسبي الأعظمي بمقدار 20% بالمقارنة مع NAC.

إن ما سبق ذكره عند (Xiao et al, 2005) تم التأكيد عليه في بحث (Gonzalez et al, 2009) هذه الظاهرة أيضاً ومن أجل الحصول على التشوه النسبي المقابل للإجهاد الأعظمي في حالة خرسانة مع 100% من RA، تم اقتراح رفع قيمة التشوه النسبي المقابل للإجهاد الأعظمي للخرسانة NAC بمقدار 20% كما يوضح الشكل (3-3).



الشكل (23-) علاقة إجهاد- تشوه من أجل RAC (Xiao et al, 2005)

(في الشكل على سبيل المثال RC-30 تعني خرسانة من ركام معاد تدويره بنسبة استبدال 30% و NC هي خرسانة من ركام طبيعي)



الشكل (33-) علاقة إجهاد- تشوه من أجل RAC (Gonzalez et al, 2009)

أيضاً بحسب (Abukersh, 2009) فإن اغلب الدراسات السابقة توصلت إلى أنّ شكل علاقة إجهاد- تشوه في RAC مشابهة لـ NAC وبالتالي فإن تصميم الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره يكون بنفس طريقة تصميم الخرسانة المنتجة من ركام طبيعي. مع زيادة عوامل الأمان عند استخدامه في العناصر الإنشائية كون التشوه الأعظمي المقابل للإجهاد الأعظمي أكبر بحوالي 10-15% في RAC عن NAC من أجل نفس الإجهاد.

4-5-3 التماسك بين RAC وبين قضبان التسليح:

The Bond Between RAC and the Reinforcement rebar

فيما يخص تأثير RA على إجهاد التماسك (Bond Strength) مع قضبان التسليح (Reinforcement rebar) فإن عدداً من الأبحاث السابقة (Abukersh, 2009; Xiao & Falkner, 2007; Waleed & Canisius, 2007) اهتمت

بدراسة هذا الموضوع، وبشكل عام تم التوصل إلى أن التماسك لا يتأثر كثيراً عند اعتماد الركام المعاد تدويره خاصة في حال استخدام القضبان المحلزنة لأن المؤثر الأساسي هو المونة الاسمنتية المحيطة بالقضبان.

في بحث لـ (Kim et al, 2012) تم بشكل أساسي دراسة التماسك بين الخرسانة وقضبان التسليح، حيث تم إجراء تجارب شد (Pull out test) لقضيب تسليح بقطر 19 مم تم غرسه في موشر خرساني، أظهرت النتائج المبينة في الجدول (10-3) أن الفرق بين إجهاد التماسك الأعظمي لـ RAC و NAC لم يتجاوز 6%.

الجدول (10-3) مقارنة نتائج إجهاد التماسك التجريبي مع المحسوب وفق بعض العلاقات (Kim et al. 2012)

| Parameter | Compressive strength (MPa) | Bond strength by test (MPa) | CEB-FIP MC90 (MPa) | ACI 318-08 (MPa) |
|-----------|----------------------------|-----------------------------|--------------------|------------------|
| NN | 45.0 | 13.5 | 13.4 | 6.6 |
| RN | 43.3 | 12.5 | 13.2 | 6.4 |

يمكن ملاحظة من الجدول الذي قدمه (Kim et al, 2012) والذي أجرى فيه مقارنة بين القيم التجريبية التي حصل عليها وبين القيم التي تعطيها بعض الكودات مناسبة القيم المحسوبة وفق CEB-FIPMC90 كون هذا الكود خاص بنمذجة الحالة التجريبية ويعطي قيمة قريبة من الناتجة عن التجربة. وهذا ما يبرر اعتماد علاقته في الدراسات التي يتم بها نمذجة التجارب.

قام (Malešev et al, 2010) بدراسة استخدم فيها RA ناتج عن تكسير عينات في المخبر وذلك وفق النسب التالية 0%، 50%، 100% كبديل عن الركام الطبيعي، تم إجراء اختبارات على التماسك بين خرسانة RAC وقضبان التسليح سواء منها الأملس (Smooth) أو المحلزن (Ribbed). لم يتجاوز الفرق بين إجهاد التماسك لـ RAC و NAC من أجل نفس نوع القضبان 10%، كما أعطت القضبان المحلزنة تماسكاً أعلى بـ 15% عن القضبان الملساء.

5-5-3 أثر RAC على سلوك الجوائز المسلحة الخاضعة للانعطاف:

The Influence of RAC on th Behavior of Reinforced Beam Subjected to Flexure

جرت دراسات عدة لتقييم استخدام RA في العناصر الإنشائية كالجوائز (Beams)، البلاطات (Slabs) والأعمدة (Columns)... الخ، حتى تصبح عملية إعادة التدوير أكثر فعالية ولا يبقى مجال استخدام RA محصوراً في أعمال الطرق، الردم، الخرسانة الكتلية وغيرها من التطبيقات التي لا تتأثر بالجودة المنخفضة لـ RA (Kumutha & Vijai, 2010).

تبيّن من خلال الاطلاع على المراجع أنّ هناك عدد من الدراسات حول تأثير RA على سلوك الجوائز الخاضعة لعزم انعطاف (Flexural Moment) وفيما يلي تم استعراض بعضها وذكر النتائج التي خلّصت إليها لأهميتها وعلاقتها بهذا البحث:

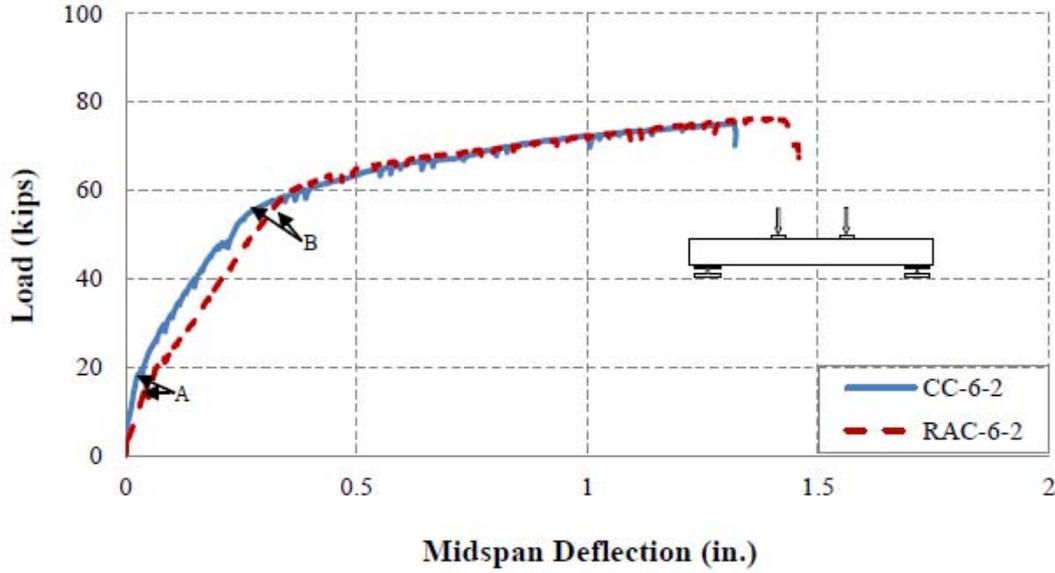
قام (Ikegawa et al, 2009) باختبار جوائز أبعادها 1800*260*200 مم من NAC و RAC بنسبة 100% من الركام المعاد تدويره وتوصل إلى انخفاض مقداره 10% في حمولة الانعطاف (Bending load) في RAC بالمقارنة مع جوائز من NAC. أيضا في هذه الدراسة تم الإشارة إلى أن امتداد الشقوق (Crack progression) يظهر في مراحل تحميل مبكرة في RAC عما هي عليه في NAC. جاء على ذكر ظاهرة التشقق المبكر في جوائز من RAC باحثين آخرين منهم (Maruyama et al., 2004; Sato et al., 2007; Ajdukiewicz and Kliszczewic., 2007; Mukai et al., 1988).

لم يتم الاكتفاء باختبار جوائز تجريبية وإنما تم في تقرير لـ (Missouri Department of Transportation Construction and Materials (MDTCM), 2014) اختبار جوائز من RAC و NAC بأبعاد حقيقية (full-scale beams) 300*400*3000 مم، وتم اعتماد 100% من الركام المعاد تدويره في RAC. كان تسليح الجوائز وفق نسبتيهما 0.47% و 0.64% وكلاهما أدنى من التسليح الأعظمي. بيّنت الدراسة أنه من أجل نفس نسبة التسليح فإن العزم الحدي (Ultimate Moment) الأعظمي يبقى نفسه، في حين أن السهم في منتصف الجائز أعلى بـ 22% في جوائز RAC مع نسبة التسليح 0.064%، فيما يخص الشقوق فعددها كان أكبر في RAC والمسافة بينها أصغر وعزم التشقق (Cracking Moment) كان أخفض بحوالي 7% من NAC وهذه النتيجة تتفق مع ما تم التوصل له عند (Maruyama et al., 2004; Sato et al., 2007).

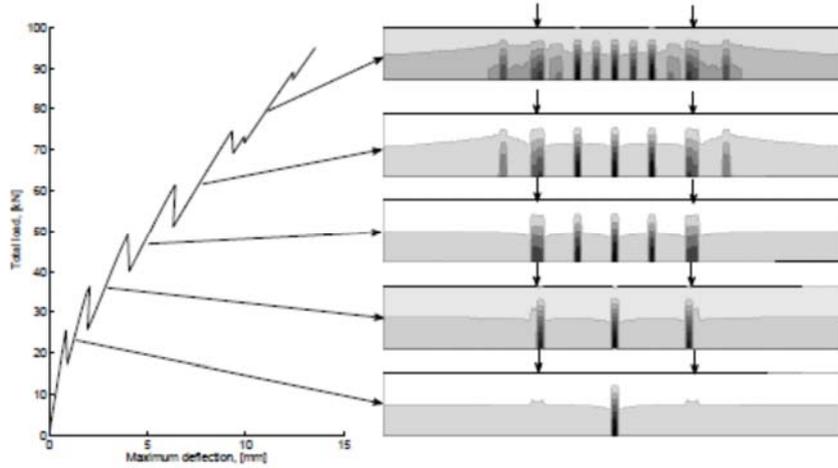
تم في هذا التقرير أيضاً إيجاد مخطط قوة- سهم (load-deflection) في منتصف الجائز من أجل خرسانة بركام طبيعي وأخرى بركام معاد تدويره مع نسبة تسليح 0.47% الشكل (3-4)، أورد التقرير أنه قبل التشقق يكون السلوك خطي مرن (Linear Elastic Behavior) حتى النقطة A، ومع زيادة التحميل تحصل انكسارات في المنحني سببها وبدء التشقق في الجائز، وعند النقطة B يدخل التسليح في الخضوع ويظهر السلوك اللدن (Ductile Behavior)، ولكن حالما يتشكل المفصل اللدن (Plastic Hinge) ويدور المقطع بشكل كافي تظهر إجهادات إضافية في منطقة الضغط مسببة تكسر في منطقة الضغط وبالتالي انهيار المقطع.

وبحسب ما جاء في التقرير فإن تفسير التشقق عند قيم للعزم أقل في RAC هو وجود منطقتين انتقاليتين (Interfacial Transition Zones (ITZ)) فيها بسبب وجود مونة قديمة وأخرى طازجة في حين أن NAC تحوي منطقة انتقالية واحدة بين سطح الركام الطبيعي والمونة الطازجة. كما تم تفسير الانخفاض في القساوة (Stiffness) إلى الانخفاض بمعامل المرونة في RAC بالمقارنة مع NAC نتيجة الحجم الأكبر للمونة في RAC.

ما يجدر الإشارة له لأهميته في هذا البحث أن المنحني الذي يوضح علاقة قوة -انتقال (الشكل 3-4) يحدث فيه انكسارات، وقد تم تفسير هذه الظاهرة بحسب دراسات مرجعية اعتماداً على التشققات حيث أوضح (Floros and Ingason, 2013) أنه في المنحنيات الناتجة عن الدراسة التحليلية فإن حصول الشق يسبب ظهور انكسارات في منحني قوة -انتقال، فكما ظهر شق كلما ظهر انكسار جديد (الشكل 3-5).



الشكل (43-) علاقة قوة-سهم لجوائز من ركام طبيعي وركام معاد تدويره (MDTCM, 2014)



الشكل (53-) ترافق ظهور الشقوق مع الهبوط في القوة في منحنى قوة- انتقال في النتائج التحليلية (Floros&Ingason, 2013)

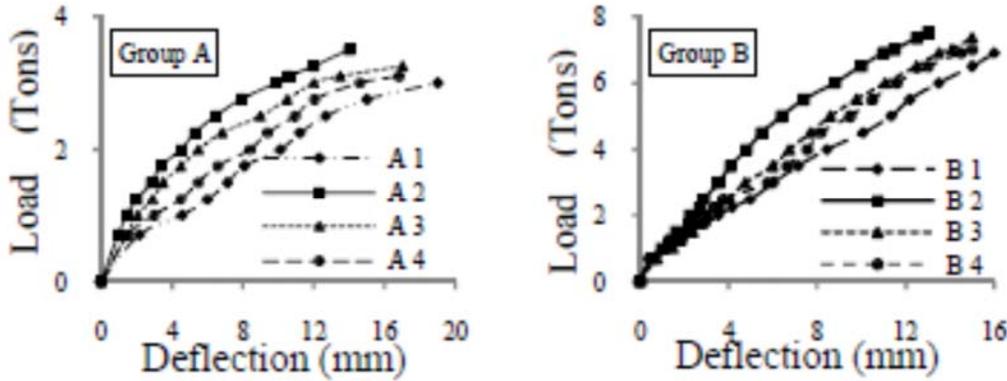
هناك دراسات حاولت رصد سلوك الجوائز مع نسب تسليح عالية (Yehia et al, 2014; Mukai et al, 1988) لدراسة حالة انهيار الجوائز على الضغط. عمد (Yehia et al, 2014) إلى دراسة جوائز بتسليح أدنى (Group A) وأعلى (Group B) من الحد الأعظمي الجدول (3-11) أبعاد الجوائز 2800*300*120 مم مع ركام معاد تدويره حتى 40%، تم التوصل من خلال هذه الدراسة إن نمط الانهيار الحاصل في حالة التسليح المنخفض كان على الشد في حين أنه كان على

الضغط مع التسليح المرتفع الشكل (3-6) أيضا بينت الدراسة أنه في حالة التسليح المرتفع كان الفرق بين السهم منتصف المجاز صغير قبل أن يبدأ التشقق. أوصت الدراسة أن يتم اعتماد نسبة 20% من RA للحصول على العناصر الإنشائية.

الجدول (3-11) تفاصيل الجوائز المختبرة في دراسة (Yehia et al, 2014)

| Beam | w/c | Add % | RCA % | A _s | stirrups | $\frac{a}{d}$ | μ |
|------|------|-------|-------|----------------|---------------------|---------------|-------|
| A1 | 0.61 | 0 | 0 | 2Φ12 | 8Φ8/m [\] | 4 | 0.7 |
| A2 | 0.47 | 0.88 | 20 | 2Φ12 | 8Φ8/m [\] | 4 | 0.7 |
| A3 | 0.49 | 0.91 | 30 | 2Φ12 | 8Φ8/m [\] | 4 | 0.7 |
| A4 | 0.5 | 0.95 | 40 | 2Φ12 | 8Φ8/m [\] | 4 | 0.7 |
| B1 | 0.61 | 0 | 0 | 4Φ16 | 10Φ8/m [\] | 4 | 2.65 |
| B2 | 0.47 | 0.88 | 20 | 4Φ16 | 10Φ8/m [\] | 4 | 2.65 |
| B3 | 0.49 | 0.91 | 30 | 4Φ16 | 10Φ8/m [\] | 4 | 2.65 |
| B4 | 0.5 | 0.95 | 40 | 4Φ16 | 10Φ8/m [\] | 4 | 2.65 |

RCA % = Recycled Concrete Aggregate Ratio, Add % = Admixture dose by weight of cement, $\frac{a}{d}$ = Shear span to depth ratio, A_s = Main bars of steel reinforcement, μ = Reinforcement steel ratio on concrete section



الشكل (3-6) علاقة قوة انتقال للجوائز المختبرة في دراسة (Yehia et al, 2014)

بعض الدراسات بحثت في صلاحية العلاقات التي تقدمها الكودات للحسابات المتعلقة بالجوائز منها دراسة لـ (Mcneil and Kang, 2013)، حيث تم فيها مناقشة كيف تأثر خصائص الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره على السلوك الإنشائي للجوائز الكبيرة وتم التوصل إلى ان انخفاض معامل المرونة في RAC يعني قابلية للتشوه بشكل أسهل وبالتالي سهم أكبر من أجل نفس الحمل. ذهبت الدراسة إلى أنه عند 40% من حمولة الانهيار فإن السهم المحسوب وفق علاقات بعض الكودات (ACI 318-11, 2011; Eurocode 2, 2004) أكبر من السهم الناتج عن التجربة، وخلصت الدراسة إلى أنه من أجل الركام المعاد

تدويره الذي استخدم بالبحث فإن استخدام RAC في الجوائز ممكن كون الأداء بقي ضمن المواصفات والاشتراطات الواجب تحقيقها من حيث قيمة السهم وعرض الشق (Crack Width) وكذلك العزم المسبب للتشقق والعزم الحدي.

وفي نفس السياق أكد (Waleed & Canisius, 2007) على إمكانية تطبيق العلاقات التصميمية التي يقدمها الكود الأوروبي (Eurocode 2, 2004) في حالة جوائز مسلحة (Reinforced Concrete Beam) من RAC من أجل 30% من الركام المعاد تدويره. تم اختيار التسليح بحيث يكون الانهيار على الشد (Tensile failure) وتم إيجاد العزم الذي يتحمله المقطع حسابياً، الأبعاد كانت 150*250*3000 مم، أوضحت النتائج أن العزوم الفعلية الناتجة عن التجربة قريبة بل أعلى قليلاً من العزوم المحسوبة وفق علاقات الكود وبالتالي من الأمن التصميم وفق الكود، تمت الإشارة أن وجود التسليح ساهم في الحد من الفرق في قيم السهم المنتشل في الجوائز.

6.3 ديمومة الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره: *Durability of Recycled Aggregate Concrete*

إلى وقت ليس بالبعيد كان تقييم جودة الخرسانة من خلال مقاومتها الميكانيكية على الضغط فقط دون الأخذ بالحسبان قرائن أخرى، لكن مع التطور العمراني السريع وتنوعه لم تعد المقاومة على الضغط هي القرينة الأساسية المقيمة لجودة الخرسانة خصوصاً عندما تتعرض الخرسانة لأوساط كيميائية مخربة، حامضية، كبريتية،... الخ. كما هو الحال في دول الخليج التي تنبتهت إلى أهميه هذا الأمر بسبب طبيعة الأجواء والظروف المناخية وطبيعة ملوحة الأرض القريبة من مياه البحر، وعليه بدأ إدخال بعض المواد الشبيهة بالأسمنت مثل (Slag , Micro silica) كونها تعطي جودة أكبر وديمومة أكثر للخرسانة عند استخدامها.

تعرف ديمومة الخرسانة (Concrete Durability) بأنها تحمل الخرسانة للظروف التي صُممت من أجلها وتعمل في 3 محيطها فترة طويلة من الزمن (العمر الافتراضي) دون حدوث تلف أو تفتت بها وبمعنى آخر فإن الديمومة هي مقاومة الخرسانة للتدهور (Deterioration) سواء كان التدهور ناتج من عوامل خارجية أو من عوامل داخلية تؤدي إلى حدوث تغيرات حجمية (Volumetric Changes) بها وكذلك نفاذ السوائل فيها تسبب مهاجمة الكيماويات مثل الكبريتات والكلوريدات للخرسانة، ماء البحر، ماء المجاري، المخلفات الصناعية.

وفيما يخص مسألة الديمومة أو مقاومة التلف لهذا النوع من الخرسانة فقد أوضح (Paul, 2011) نقلاً عن باحثين آخرين الأمور التالية:

- إن نفاذية (Permeability) خرسانة RAC ومساميتها (Porosity) أكبر من خرسانة NAC ويزداد الفارق كلما كانت نسبة الماء إلى الاسمنت المستخدمة أكبر، حيث قُدرت نفاذية خرسانة RAC بخمسة إلى عشرة أضعاف خرسانة NAC عندما تستخدم نسبة استبدال 100% وبالتالي فإن ديمومة RAC تكون منخفضة وخاصة في المراحل المبكرة فيها وتحسن الديمومة مع زيادة عمر الخرسانة.

- تعتبر نسبة RA في الخلطة مؤثر هام على ديمومة الخرسانة فعلى سبيل المثال لا يلحظ تغيير كبير في مقاومة الخرسانة لهجوم الكلورايد (Chloride Penetration) في RAC بالمقارنة مع NAC عندما تكون نسبة الاستبدال 20% في حين تنخفض بشكل ملحوظ عند نسبة استبدال 100%.
- بالنسبة لعمق الكربنة (Carbonation Depth) في خرسانة RAC يكون لكمية الاسمنت دوراً كبيراً فيها فعند استعمال 400 Kg/m^3 لا يلاحظ فارق في عمق الكربنة بين RAC وNAC ولكن يجب أن يتم استخدام الركام وهي في الحالة المشبعة أو الرطبة.

تعتبر المواد البوزولانية (Pozzolanic Materials) التي سنأتي على ذكرها لاحقاً واحدة من أهم الحلول المستخدمة للتخفيف من نقاط ضعف RAC على الديمومة كونها تساعد على تقليل المسامية أحد أكبر عيوب RAC، وتستعمل إما كإضافة على الخلطة الخرسانية أو من خلال الاسمنت البورتلاندي البوزولاني (Portland Pozzolana Cement) والذي يعتمد كثيراً عندما يراد مقاومة أكبر للظروف المحيطة.

7.3 المنطقة الانتقالية بين الركام والعجينة الاسمنية في RAC: *Interfacial Transition Zone in RAC (ITZ)*

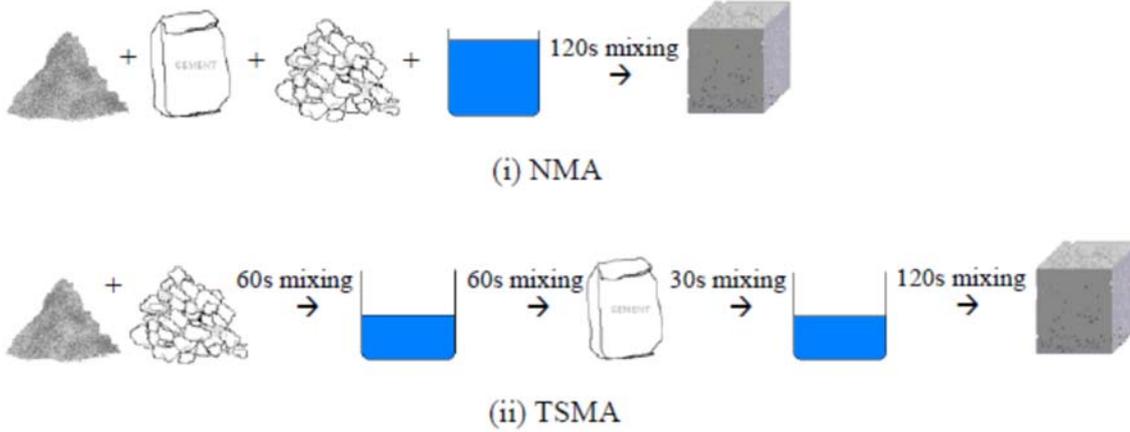
تعتبر المنطقة الانتقالية بين الركام والعجينة الاسمنتية (Interfacial Transition Zone in RAC, ITZ) مؤثر هام على المقاومة RAC ومن خلال دراستها يمكن معرفة البناء الداخلي لهذه الخرسانة وتم تسليط الضوء بصورة مبسطة على هذه المسألة حسب ما جاء في بعض الدراسات كونها تفسر العديد من الظواهر الخاصة بـ RAC.

درس (Tam et al, 2004) أثر طريقة الخلط على ITZ حيث استخدم طريقتين الطريقة التقليدية (Normal Mixing Approach, NMA) وطريقة أخرى يتم فيها خلط الماء على مرحلتين (Two-Stage Mixing Approach, TSMA) موضحتين بالشكل (7-3) على NAC وRAC بنسب استبدال تتراوح بين 0% حتى 30% لركام الطبيعي ونسبة ماء للاسمنت 0.45. تبين من النتائج أن طريقة TSMA تحسّن المنطقة الانتقالية حيث يعمل الاسمنت في المرحلة الأولى على إغلاق الشقوق والفراغات في RA وبالتالي تحسّن المقاومة على الضغط وباقي المواصفات الميكانيكية.

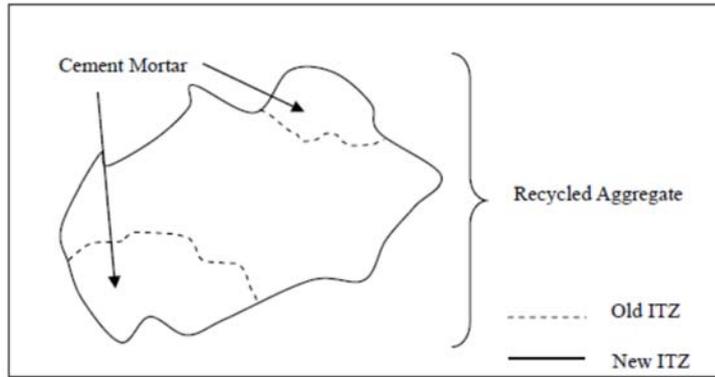
أوضح (Tam et al, 2004) أنّ المسافة بين جزيئات الركام تكون بين 75 ميكرومتر حتى 100 ميكرومتر، وبما أنّ سماكة المنطقة الانتقالية بين الركام والعجينة الاسمنتية حوالي 40 ميكرومتر وبالتالي فهي تشكّل 20-40% من الحجم الكلي للمادة الاسمنتية. تعتبر ITZ هي المنطقة الأضعف في الخرسانة وبسبب وجودها تنهار العينات عند إجهاد أخفض من الإجهاد الذي تتحمّله مكونات الخرسانة (الركام والمونة).

هناك منطقتان انتقالتان في خرسانة RAC (الشكل 7-3) الأولى بين RA والعجينة الاسمنتية الجديدة وتسمى المنطقة الانتقالية الجديدة (New ITZ) والثانية بين RA والعجينة الاسمنتية القديمة العالقة به وتسمى المنطقة الانتقالية القديمة (Old ITZ)، تحوي هذه المنطقة مسامات (Pores) وشقوق (Crack) تؤثر على المقاومة الحدية لخرسانة RAC وذلك لأن هذه المسامات والشقوق تحجز الماء داخلها وبالتالي تقلّل من كمية الماء الحر الذي يمكنه الدخول في تفاعلات الإماهة لتشكيل الحجر

الاسمنتي الذي يمنح الخرسانة الصلابة والكتامة، هذه الظاهرة هي وراء الجودة المنخفضة لخرسانة RAC الأمر الذي يحد من استخدامها في تطبيقات تتطلب مقومات عالية.



الشكل (73-) مراحل الخلط وفق الطريقة التقليدية ووفق طريقة المرحلتين (Tam et al, 2004)



الشكل (83-) المناطق الانتقالية الموجودة في الركام المعاد تدويره ضمن الخرسانة (Tam et al, 2004)

تعمل ITZ في الخرسانة كجسور تصل بين الركام وبين المونة الاسمنتية وفي حال تكسر هذه الجسور بسبب الفراغات والشقوق فيها ستفقد الخرسانة صلابتها حتى وان كانت صلابتها عالية لأن انتقال الإجهادات فيما بينها أصبح غير ممكن.

إن لمقاومة المونة القديمة الملتصقة ونسبة الماء للاسمنت المستخدمة دور في تحديد مقاومة خرسانة RAC، فعندما تكون مقاومة ITZ القديمة أعلى من مقاومة ITZ الجديدة تكون مقاومة RAC مساوية لمقاومة NAC، أما عندما تكون مقاومة ITZ القديمة أقل من ITZ الجديدة تكون مقاومة RAC أقل من مقاومة الخرسانة التقليدية NAC.

8.3 استخدام الإضافات البوزولانية في الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره: *Using the Pozzolanic Material in RAC*

ازداد مؤخراً استخدام المواد البوزولانية كإضافات فلزية على الخرسانة لأسباب عديدة أهمها تخفيض التكاليف وخاصة عندما تستخدم كبديل جزئي عن الاسمنت. يساعد تشكّل الحجر الاسمطي الإضافي الناتج عن تفاعل هيدروكسيد الكالسيوم الناتج عن هدرجة الاسمنت مع أكسيد السيليسيوم الفعّال الموجود ضمن هذه الإضافات على ملء المسامات والشقوق الموجودة في مكونات الخرسانة. تم فيما يلي تعريف للمواد البوزولانية وذكر أنواعها وكذلك تأثيرها على خواص الخرسانة وبالأخص RAC بحسب بعض الدراسات المرجعية.

1-8-3 تعريف المواد البوزولانية: *Definition of Pozzolanic Materials*

المواد البوزولانية هي خامات سيليسية وألومينية ليست ذات قدرة لاصقة أو أسمنتية إلا أنها تتفاعل بوجود الماء مع هيدروكسيد الكالسيوم الناتج من تفاعل الإماهة (hydration) للاسمنت لتكوّن مركب ذا خواص إسمنتية ويتمتع بمتانة مقبولة، تتواجد هذه المواد إما في الطبيعة كخامات معدنية أو يمكن تحضيرها صناعياً.

2-8-3 أنواع المواد البوزولانية: *Types of Pozzolanic Materials*

يمكن التمييز بين نوعين من البوزولانا وذلك حسب المنشأ: البوزولانا الطبيعية والصناعية (الرفاعي، 2004):

أ-الخامات الطبيعية:

• (Clay & Shale) الطفلة والطين

• (Opaltine Materials) المواد الأوبالية

• (Volcanic Tuffs) الرواسب البركانية

ب-الخامات الصناعية:

• رماد الفحم (Fly Ash) ويستخرج من أفران المحطات الحرارية التي تستخدم الفحم كوقود.

• رماد الطين الطفيلي الزيتي المحروق: وهذا النوع من الطين يكون أصلاً محتوياً على كمية من زيت البترول ويحرق كوقود والرماد الناتج هو الذي يمكن استخدامه.

• الطوب المحروق -الطوب الحراري المطحون -خبث الأفران العالية (Furnace Slag) (المبرد فجائياً بالماء والمبرد بالهواء)

- السيليكا فوم (Silica Fume) ويتم تصنيع هذه المادة خلال عملية تصنيع السيليكون أو الفيروسيليكون كروية ميكروسكوبية يبلغ القطر المتوسط لهذه الجزيئات (0.1-0.15) ميكرون يتم معالجتها بواسطة التكثيف بالضغط

3-8-3 تأثير المواد البوزولانية على الخرسانة *The Influence of Pozzolan Materials on Concrete*

يعتبر استخدام الاضافات البوزولانية من الأمور التي تعالج مشكلة الشقوق والمسامات كما أنّها تقدّم الكثير من الميزات للخرسانة نذكر منها (Abukersh, 2009):

- تحسّن قابلية التشغيل وتقلّل من ظاهرة النزف والفصل بين مكونات الخلطة.
- تخفّض الحرارة الناتجة عن تفاعلات الإماهة وبالتالي يقلّل من خطر ظهور الشقوق الحرارية.
- يزيد من مقاومة التحميل طويل الأمد.
- تخفّف من التعرض للتأثير التخريري للوسط الخارجي والتأثير المشترك للماء والصقيع وتناوب الرطوبة والجفاف.
- يقلّل من النفوذية واختراق الكلور والسلفات وأيضاً خطر تدهور الفولاذ.
- يحسّن قدرة الخرسانة على مقاومة الهجوم الكيميائي كالهجوم الكبريتي ويقاوم تفاعل السيليكا النشطة في الركام مع القلوية.
- يزيد من زمن الأخذ للخرسانة ويعطي وقت أطول للخلط والصب.
- ولأنه في أغلب الحالات تكون هذه المواد بمثابة فضلات لعدة صناعات يعد استخدامها مفيداً بيئياً وأيضاً اقتصادياً وخاصة في حال استخدامها كبديل عن الاسمنت الذي يعتبر العنصر الأكثر كلفة في الخلطة. ولهذا الأمر فوائد على عدة مستويات فهو يساعد في زيادة إنتاج المصنع ويوفر الطاقة و الحرارة والكهرباء للمصنع ويقلل من انبعاث غاز (CO2) ويقلل من الاحتباس الحراري بنسبة 20%. كما أنّ ذلك يساهم بتقليل التلوث البيئي والضوضاء.

وبالنسبة للمقاومة على الضغط فتكون أقل بعد مرور وقت قصير وأعلى بعد مرور وقت طويل حيث تعطي مقاومة مناسبة لجميع أغراض الاستخدام العادي.

4-8-3 تفاعل المواد البوزولانية: *The Reaction of Pozzolan Materials*

الهدف من وراء هذه الفقرة هو إعطاء فكرة عن كيفية تفاعل المواد البوزولانية مع الاسمنت أو بالأحرى تفاعل أكسيد السيليسيوم الفعّال (Reactive silicon dioxide, SiO₂) الموجود في المواد البوزولانية مع هيدروكسيد الكالسيوم (calcium hydroxide) الناتج عن تفاعلات الإماهة، حتى يتضح كيف تساهم هذه المواد في رفع المقاومة وتحسين مواصفات الخرسانة.

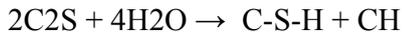
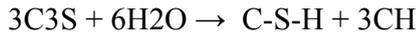
إن عمليات تفاعل الإسمنت الحاوي على البوزولانا مع الماء ذات ميزة معقدة بالمقارنة مع عمليات الإماهة للإسمنت البورتلاندي وتكون على مرحلتين (الرفاعي، 2004):

-المرحلة الأولى : تفاعل مكونات الكلينكر (C3S, C2S, C3A, C4AF) والموضحة في الجدول (3-12) مع الماء والحصول على نواتج الإماهة وأهمها هيدروسيليكات الكالسيوم (calcium silicate hydrate, CSH) بنسبة 70% تقريباً وهيدروكسيد الكالسيوم (Ca(OH)₂), (hydrated lime (CH) بنسبة 20%، ما يمنح الخرسانة المتانة والصلابة هو CSH وينتج بشكل أساسي من تفاعل (3CaOSiO₂, C3S) و(2CaOSiO₂, C2S) مع الماء، أما هيدروكسيد الكالسيوم CH فبنيتة الكرسالية هشة وينحل بالماء مسبب نقاط ضعف داخل الخرسانة.

الجدول (3-12) مكونات الكلينكر والصيغ الكيميائية لها (الرفاعي، 2004)

| النسبة الوزنية (%) | الرمز الخاص | الصيغة الكيميائية | اسم المركب |
|--------------------|-------------------|---|---|
| 42-65 | C ₃ S | 3CaO.SiO ₂ | سيليكات ثلاثية الكالسيوم (ألبيت) |
| 15-50 | C ₂ S | 2CaO.SiO ₂ | سيليكات ثنائية الكالسيوم (بيليت) |
| 2-15 | C ₃ A | 3CaO.Al ₂ O ₃ | ألومينات ثلاثية الكالسيوم |
| 10-25 | C ₄ AF | 4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ | ألومينات وحديدات الكالسيوم الرباعية (سيليت) |

يمكن التعبير عن هذه المرحلة بالشكل المبسط التالي:



- المرحلة الثانية: تفاعل البوزولانا مع نواتج الإماهة وخاصة CH وهي معقدة ولكن باختصار فإنها تتعلق بتركيب الإضافة البوزولونية وعلى الأخص أكسيد السيليسيوم الفعال SiO₂ الذي يتفاعل مع CH ليشكل كمية إضافية من هيدروسيليكات C-S-H وفق التفاعل المبسط التالي:



اعتماداً على ما سبق يمكن تفسير ظاهرة انخفاض المتانة الميكانيكية للإسمنت الحاوي على البوزولانا في الأيام الأولى وزيادتها في الفترات ما بعد 28 يوماً بأن تتشكل C-S-H الناتج عن المواد البوزولانية يأتي تتشكله في مرحلة لاحقة أي بعد بدء تفاعلات إماهة الإسمنت وتشكل CH.

بالإضافة إلى الدور الكيميائي للمواد البوزولانية في تشكيل C-S-H الذي يرفع من المقاومة، فإن لها دور فيزيائي حيث أن وجود هذه المادة الناعمة في الخلطة يجعل لها دور مالى للمسامات والفراغات وهذا أمر يساهم في تحسين المقاومة أيضاً.

5-8-3 دراسات سابقة حول الإضافات البوزولانية: *Previous Research about Pozzolanic Materials*

إن الأبحاث التي درست تأثير استخدام الإضافات البوزولانية على RAC كثيرة نذكر منها:

قام (Gonzalez & Martinez, 2008) بدراسة تأثير غبار السيلكا، في هذه الدراسة تم استخدام RA مصدره من خرسانة نظيفة خالية من الشوائب. أوضحت النتائج انه من أجل RA50 يمكن الحصول على خرسانة RAC تماثل NAC عندما يراد مقاومة ضغط تصل حتى 30 N/mm^2 في اليوم 28 من خلال زيادة كمية الاسمنت بمقدار 6.2%، أو من خلال إضافة غبار السيلكا بنسبة 8% من وزن الاسمنت المضاف للخلطة الخرسانية، كما أوضحت النتائج أن مقاومة الشد ومعامل المرونة لم يتحسنا بشكل ملحوظ بإضافة غبار السيلكا.

بحث (مرزا، 2009) في استخدام نسب عالية من الركام المعاد تدويره كبديل عن الركام الطبيعي، وتراوحت هذه النسب بين 0% إلى 100% من RA. كما تم استخدام غبار السيلكا بنسب 5%، 10%، 15% كنسب استبدال من وزن الإسمنت، وأيضاً 10% كنسبة إضافية من وزن الإسمنت لتحسين خواص الخرسانة المنتجة ممن ركام معاد تدويره، وقد كان محتوى الإسمنت في جميع الخلطات ثابتاً ومساوياً 400 Kg/m^3 . وقد تم دراسة سلوك الخرسانة المنتجة من الركام المعاد تدويره من خلال تعيين مقاومتى الضغط والشد غير مباشر لأعمار مختلفة : 3، 7، 14، 28 يوم. أظهرت النتائج أنه يمكن استخدام نسب عالية من الركام المعاد تدويره لإنتاج خرسانة ذات جودة عالية تتراوح مقاومتها للضغط بين 40 N/mm^2 إلى 50 N/mm^2 واتضح من النتائج زيادة نسبية في قيم المقاومة للأعمار المتأخرة RAC عن مثيلاتها في NAC وذلك لأن الركام المعاد تدويره يعمل كخزان مياه يساعد في استمرار عملية هدرجة الإسمنت. وقد لوحظ أيضاً تحسّن في خواص الخرسانة ذات الركام المعاد تدويره باستخدام غبار السيلكا وهذا التحسّن مرتبط بنسب غبار السيلكا وطريقة استخدامه، وكذلك بجودة الركام المعاد تدويره ونسب استبداله. تحققت أفضل النتائج لمقاومة الضغط والشد عند محتوى 5% من غبار السيلكا كنسبة استبدال مع RA100.

يجب التنويه فيما يخص غبار السيلكا إلى أنّ استخدامه غير مرغوب به لعدة أسباب منها كونه مكلف بالمقارنة مع باقي الإضافات كما أن نعومته وحببياته الصغيرة ($0.1-0.2 \mu\text{m}$) وشكله غير المنتظم يتطلب جرعة أكبر من المدلنات مثل مؤخر التصلب أو مخفّض الماء للحفاظ على قابلية التشغيل (Mazloom, 2004) على عكس الرماد المتطاير الذي يحسن قابلية التشغيل بفضل شكل حببياته ورخص ثمنه بالمقارنة مع الاسمنت، وبالتالي فقد احتل مساحة واسعة من البحث العلمي. لأنه يخفّض من كمية ماء الخلط ويعطي خرسانة سهلة الدمك ذات ليونة وقابلية تشغيل عالية أثناء الصب ونعومة على سطح الخرسانة بعد الانتهاء من الصب، مع سهولة ضخ الخرسانة للموقع، وهذا يوفر كثيراً من الجهد والوقت ويوفر الأيدي العاملة.

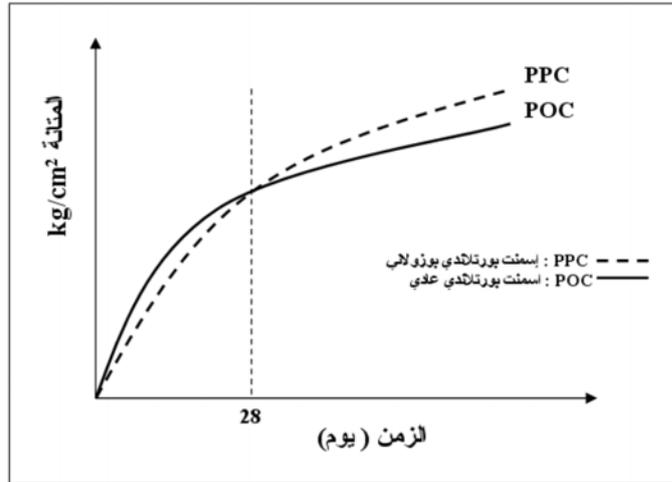
قام (Abukersh, 2009) بدراسة أثر الرماد المتطاير أولاً كبديل عن الرمل الناعم في الخلطة الخرسانية في RAC ونتج عن الدراسة أن نسبة استبدال تتراوح بين 20-25% تعطي RAC بنوعية جيدة على الرغم أنه تم استخدام 100% من RA، حيث تمكن من الحصول على مقاومة الضغط المطلوبة وبقابلية تشغيل جيدة ولم يتغير أداء RAC بالنسبة للشد وكان المقاومة على التحميل طويل الأمد أفضل. ثانياً درس (Abukersh, 2009) تأثير الرماد المتطاير كبديل عن الاسمنت بنسبة 30% مع ملدن ونسبة W/C منخفضة، أظهرت النتائج أنه يمكن الحصول على RAC مع 100% من RA بمقاومة وقساوة شبيهة بـ NAC.

قام (Kou, 2005) بدراسة تأثير الرماد المتطاير على عدد من الأمور وهي مقاومة الضغط - مقاومة الشد غير المباشر (splitting) - معامل المرونة الستاتيكي - الانكماش الجاف... الخ على الخرسانة المنتجة من الركام المعاد تدويره. وأظهرت النتائج انخفاض قيم مقاومة الضغط والشد، ومعامل المرونة الستاتيكي عند جميع الأعمار مع زيادة الركام المعاد تدويره. علاوة على ذلك، سببت زيادة كمية الركام المعاد تدويره نقصاً واضحاً في مقاومة النفاذية لأيون الكلور وزيادة الانكماش الجاف والزحف (Creep) للخرسانة. أما عند استخدام الرماد المتطاير كبديل للأسمنت فإنه يحسّن من مقاومة النفاذية وكذلك قيم الانكماش الجاف والزحف لـ RAC.

تمت ملاحظة بأن عدد من الباحثين استخدموا الاسمنت البورتلاندي البوزولاني مع RA (Kumutha et al, 2010; Murali et al, 2012)، إن هذا الاسمنت هو عبارة عن اسمنت بورتلاندي يضاف إليه البوزولانا بنسب معينة عندما يتم طحن الكلينكر (Clinker)، ففي دراسة لـ (Kumutha et al, 2010) تم إيجاد الخصائص الميكانيكية عند استبدال الركام الطبيعي NA بالركام المعاد تدويره RA من أجل نسب مختلفة، تم التصميم على مقاومة ضغط 20 MPa، وكان الاسمنت المستخدم اسمنت بورتلاندي بوزولاني، نسبة الماء للأسمنت 0.5. توصلت الدراسة إلى إمكانية الوصول إلى مقاومة الضغط المطلوبة لـ RAC حتى مع استخدام نسبة RA100، أما فيما يخص مقاومة الشد، الانعطاف ومعامل المرونة فقد أوضحت الدراسة بأنها تتأثر ونسبة الانخفاض الحاصل بالمقارنة مع NAC هو ع التالي 36%، 50%، 18% وذلك من أجل نسبة استبدال كاملة 100%.

في هذا الصدد درس (الرفاعي، 2004) تأثير الطف البركاني (البوزولانا الطبيعية) المأخوذ من تل شيحان على مقاومة الضغط للخرسانة عند إضافته بنسب متزايدة لغاية 20%. تم في الدراسة طحن الكلينكر مع الطف البركاني إلى درجة نعومة عالية وتم تحديد الخواص الفيزيائية والكيميائية لكل خليط. نتج عن الدراسة أن البوزولانا المضافة للأسمنت لها تأثير على مقاومة الضغط حيث أدت إلى التقليل من المقاومة في المرحلة المبكرة وزيادتها في المرحلة المتأخرة وخاصة بعد 28 يوماً. وبحسب نتائج الدراسة فإنه من الممكن إنتاج اسمنت مخلوط يحتوي على بوزولانا بنسبة تصل إلى (15%) وبخواص أفضل من الاسمنت البورتلاندي العادي خاصة في المشاريع التي تقام بتماس مع المياه أو في المناطق ذات الرطوبة العالية لأن له دور في التقليل من نفاذية الخرسانة المصنوعة منه وزيادة ممانعتها لامتصاص الماء، انخفاض حرارة التمهيه (Heat of hydration)، منع أو تقليل نزع الخرسانة (Bleeding)،

يوضح الشكل (3-9) الفرق في تطور المقاومة بين الاسمنت البورتلاندي (PPC) والاسمنت البورتلاندي البوزولاني (POC) يتضح من الشكل انخفاض المتانة (مقاومة الضغط) للإسمنت البورتلاندي البوزولاني في الأيام الأولى وزيادتها في الفترات ما بعد 28 يوماً، يفسر ذلك كما تم التوضيح سابقاً بأن تفاعلات الإماهة تكون على مرحلتين: مرحلة أولى يتم فيها إماهة الاسمنت ومرحلة ثانية يحصل فيها تفاعل بين نتائج المرحلة الأولى والبوزولانا حيث يحصل نتيجة لذلك انعدام المركبات ذات القلوية العالية نتيجة تفاعلها مع البوزولانا وتحولها إلى مركبات أكثر ثباتاً و متانة وخاصة في الفترة الزمنية المتأخرة.

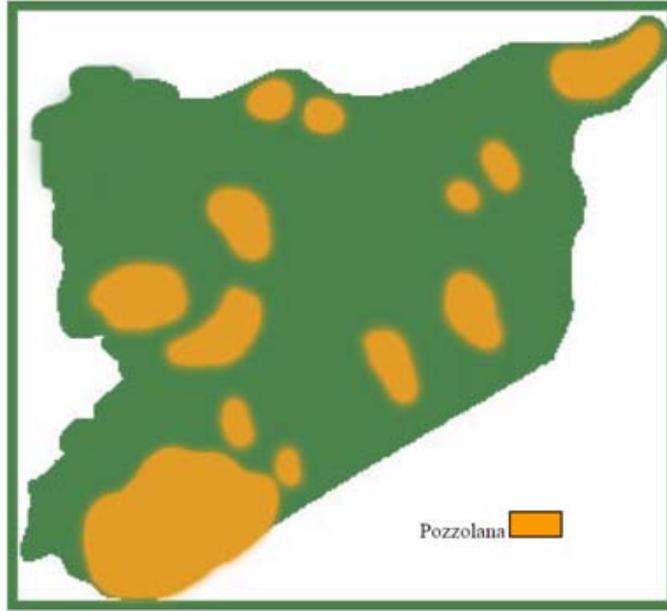


الشكل (93-) تأثير الإسمنت البوزولاني على المتانة بالمقارنة مع الإسمنت البورتلاندي العادي (الرفاعي، 2004)

6-8-3 البوزولانا الطبيعية في القطر العربي السوري The Natural Pozzolana in Syria

تعتبر البوزولانا الطبيعية أو ما يسمى السكوريا من الثروات الهامة في القطر العربي السوري، و تتواجد هذه المادة في القطر العربي السوري بكميات كبيرة ونوعية جيدة وخاصة في المنطقة الجنوبية ومصدرها بركاني. ويوضح الشكل (3-10) أماكن توزع البوزولانا الطبيعية في القطر العربي السوري وفق تقرير فني لأعمال التنقيب الجيولوجي عن الخبث البركاني أجرته المؤسسة العامة للجيولوجيا والثروة في عام 1999م. (الرفاعي، 2004)

أجريت دراسات بحثية لبيان إمكانية الاستفادة من البوزولانا الطبيعية الناتجة عن ثوران البراكين حتى يتم استثمار هذه الثروة الطبيعية المنتشرة على شكل أغطية تشغل سدس مساحة القطر العربي السوري، وقد أظهرت الأبحاث العملية المخبرية التي قامت بها هيئة المواصفات أثر إضافة البوزولانا على خصائص المونة الاسمنتية وعلى خواص الخرسانة الطازجة والمتصلبة وخواص الديمومة، وقد تم اعتمادها من قبل لجنة الكود السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت بالخرسانة المسلحة ومن قبل نقابة المهندسين في عام 2009. وكتطبيق على هذه الدراسة يتم الآن إنتاج اسمنت بورتلاندي بوزولاني سوري يتم فيه إضافة بوزولانا بنسبة تصل لـ 25% وبنعومات مدروسة تحقق المواصفات القياسية (دي برس، 2009).



الشكل (103-) أماكن توزع المواد البوزولانية الطبيعية في سوريا (الرفاعي، 2004)

أصبح إنتاج الاسمنت المحتوي على البوزولانا موجود وبكثرة وفي مختلف الدول وازدادت الكميات المنتجة منه واتسع نطاق استعماله وذلك نتيجة الوفرة المتحقق في الطاقة وتخفيض تكاليف الإنتاج وأيضا للمزايا العديدة التي يتفوق فيها هذا النوع من الاسمنت على الاسمنت العادي، غير انه يجب ألا يغيب عن البال أن تطوير اسمنت بوزولاني أو بورتلاندي بوزولاني بمواصفات عالية يتطلب إنفاقاً سخياً على الدراسات الجيولوجية في مواقع البوزولانا للوصول إلى الأنواع الجيدة والتعرف على صفاتها الكيميائية والفيزيائية خاصة تلك المتعلقة بالفعالية البوزولانية وقابلية الطحن والبري وامتصاص الماء. كما أن استخراج البوزولانا من مكائنها ونقلها وتكسيبرها وخطها وتخزينها وتكثيف الرقابة النوعية عليها، كل ذلك ينعكس على كلفة الإنتاج مما يحد من الميزة المتحققة نتيجة الوفرة في الطاقة، ومع ذلك فالجدوى الاقتصادية لإنتاج هذين النوعين من الاسمنت. تظل مؤكدة إذا كانت البوزولانا المستعملة من النوع الجيد الفعال.

9.3 جديد البحث :

دلت الدراسات المرجعية السابقة على أن الخصائص الميكانيكية لمادة الخرسانة تتغير باستخدام الركام المعاد تدويره في الخلطة الخرسانية، وكانت جميع الأبحاث السابقة تجريبية. من الدراسات المرجعية يمكن استعراض جديد البحث بما يلي:

- لم يتم في الدراسات السابقة دراسة أثر إضافة مادة البوزولانا الطبيعية السورية على الخصائص الميكانيكية للخرسانة مع ركام معاد تدويره، وقد تم في هذا البحث القيام بدراسة تجريبية باستخدام هذه الإضافات.
- تقديم علاقة تجريبية لتحديد معامل المرونة لخرسانة منتجة من ركام معاد تدويره أعطت تقارب مقبول مع القيم التجريبية الفعلية.

- كانت دراسة استخدام مادة الخرسانة من ركام معاد تدويره والمسلحة للعناصر المعرضة للانعطاف محدودة، من هنا يأتي جديد هذا البحث في التركيز على الجوائز المعرضة للانعطاف وتأثير المادة الجديدة على قدرة تحملها من أجل أنماط انهيار مختلفة.
- كانت الدراسات السابقة تجريبية، بينما يأتي البحث الحالي بشقين تجريبي وتحليلي مع التوسع في الشق التحليلي للجوائز المعرضة للانعطاف.

الفصل الرابع

مواد البحث وطرائقه

The Materials and Methodology of the Research

1.4 مقدمة

introduction

أصبح تقييم كفاءة الركام المعاد تدويره ومحاولة استخدامه كبديل جزئي أو كلي عن الركام الطبيعي في العناصر الإنشائية حاجة ملحة في ظل محدودية المصادر الطبيعية للركام ومحاولة تطبيق مبدأ الاستدامة لها. وبحسب ما ورد في الدراسة المرجعية الواردة في الفصل السابق فإنه من الممكن تحسين أداء الركام المعاد تدويره باستخدام تكنولوجيا متطورة وبإضافة مواد فلزية وكيميائية للخرسانة كالمواد البوزولانية والملدنات. تحقق الخرسانة عادية المقاومة المصنعة من ركام طبيعي مقاومة تصل لـ 50 N/mm^2 بعد 28 يوماً جدول (1-4) وتستخدم بشكل كبير في أغلب التطبيقات على عكس الخرسانة عالية المقاومة التي تطبيقاتها محدودة وفي مجالات معينة (Abukersh, 2004). لذلك تم في هذه الدراسة التركيز من أجل الحصول على الخرسانة عادية المقاومة -المقاومة المطلوبة 30 N/mm^2 - والمنتجة من ركام معاد تدويره كبديل جزئي أو كلي عن الركام الطبيعي مع إضافات هي الملدنات والبوزولانا الطبيعية، فبحسب الدراسات السابقة إضافة هذه المواد قد يعطي خرسانة RAC قادرة على مجارة خرسانة NAC سواء بمقاومتها أو ديمومتها.

الجدول (1-4) تصنيف الخرسانة بحسب مقاومتها على الضغط (Abukersh, 2009)

| Type of concrete | Range of compressive strength (N/mm ²) |
|--|--|
| Ordinary Concrete (OC) | Up to 50 |
| Ordinary Lightweight Concrete (OLC) | Up to 50 |
| High Performance Lightweight Concrete (HPLC) | > 50 |
| High Strength Concrete (HSC) | 50-80 |
| Very High Strength Concrete (VHSC) | 80-130 |
| Fibre Concrete Composites (FCC) | 150-800 |
| Reactive Powder Concrete (RPC) | 200-800 |

تم في هذا الفصل عرض خصائص المواد المستخدمة، نسب مكونات الخلطات الخرسانية وطرق الاختبارات المتبعة. حيث تم في هذا البحث استخدام نسب مختلفة من الركام المعاد تدويره كبديل عن الركام الطبيعي، وتراوح هذه النسب بين 0% إلى

100% من الركام المعاد تدويره. محتوى الإسمنت البورتلاندي العادي في الخلطات بدون إضافات بوزولانية ثابتا ومساويا 350Kg/m^3 مع نسبة ماء إلى اسمنت مساوية إلى 0.55. تم استخدام البوزولانا الطبيعية (الطف البركاني) بنسب 15 % من وزن الإسمنت كنسبة استبدال و كنسبة إضافة كما سيأتي توضيحه لاحقا.

2.4 المواد:

The Materials

1-2-4 المواد الرابطة:

Cementitious Materials

• الاسمنت (Cement)

تم استخدام الاسمنت البورتلاندي العادي Type I ماركة 42.5 الذي ينتجه معمل إسمنت عدرا بريف دمشق، حيث يحوي هذا المعمل على ثلاثة خطوط إنتاج تعمل بالطريقة الجافة، ويتم اعتماد على مواد أولية مأخوذة من المقالع القريبة من الشركة كالحجر الكلسي، البازلت والغضار لإنتاج اسمنت يحقق المواصفة القياسية السورية والتي تشترط أن لا تقل نسبة الكلينكر فيه عن 95% وأن لا تزيد الإضافات فيه عن 5% (الرفاعي، 2004).

تم طلب كمية الاسمنت كاملة وأخذها من خط إنتاج واحد في نفس اليوم حتى يكون الاسمنت المستخدم في التجارب متجانس وبمواصفات واحدة، كما تم إجراء اختبارات على عينة من الاسمنت المعتمد في معمل اسمنت عدرا للحصول على الخواص الفيزيائية والكيميائية وذلك بحسب المواصفات المعتمدة في الجمعية الأمريكية لاختبارات المواد (ASTM, 2004) يوضح الجدول (2-4) الخواص الفيزيائية للاسمنت المعتمد في هذا البحث وهي المقاومة على الضغط، نعومة الاسمنت بحسب بلين 1992-6-196 BSEN، الوزن النوعي، الوزن الحجمي وزمن بداية ونهاية الأخذ. أما نتائج التحليل الكيميائي للاسمنت فيوضحها الجدول (3-4).

الجدول (2-4) المواصفات الفيزيائية لاسمنت المستخدم في الدراسة الحالية

| المقاومة نيوتن/مم ² | اليوم | |
|-----------------------------------|----------------|--|
| 15.78 | 2 | المقاومة على الضغط للمونة الاسمنتية |
| 32.26 | 7 | |
| 34.95 | 14 | |
| 43.8 | 28 | |
| 137 | بدايته (دقيقة) | زمن الأخذ لاسمنت |
| 3:02 | نهايته (ساعة) | |
| 3.1 | | الوزن النوعي |
| 1150 | | الوزن الحجمي (كغ/م ³) |
| 3107 | | اختبار درجة النعومة حسب بلين (سم ² /غ) |

الجدول (3-4) الخواص الكيميائية لاسمنت المستخدم

| النسبة المئوية | العنصر |
|----------------|--------------------------------|
| 20 | SiO ₂ |
| 4.77 | Al ₂ O ₃ |
| 4.57 | Fe ₂ O ₃ |
| 60.11 | CaO |
| 3.64 | MgO |
| 1.96 | SO ₃ |
| 1.32 | L.O.I |

تم اعتماد معادلات بوغ (Bogue Formula) الموضحة فيما يلي (VTU, 2000) لحساب الخواص المينيرالية للاسمنت وتم إدراج النتائج في الجدول (4-4).

Bogue Formulas

$$C_3S = 4.071 CaO - (7.6 SiO_2 + 6.718 Al_2O_3 + 1.43 Fe_2O_3 + 2.852 SO_3)$$

$$C_2S = 2.867 SiO_2 - 0.7544 C_3S$$

$$C_3A = 2.65 Al_2O_3 - 1.692 Fe_2O_3$$

$$C_4AF = 3.043 Fe_2O_3$$

الجدول (4-4) الخواص المينيرالية للاسمنت المستخدم في هذه الدراسة

| C ₃ S | C ₂ S | C ₃ A | C ₄ AF |
|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 48.53 | 20.72 | 4.9 | 13.9 |

• البوزولانا الطبيعية (الطف البركاني):

The Natural Pozzolana (Volcanic Tuff)

تم إحضار المواد البوزولانية الطبيعية (الطف البركاني) المستعملة في هذا البحث من محافظة السويداء من تل شيحان بالقرب من مدينة شهباء، حيث يعتبر هذا الموقع من أشهر المواقع في القطر لكونه يحتوي على كميات كبيرة من هذه المادة (الشكل 1-4)، ويعتبر هذا التل الوحيد في المنطقة المتمثل بمخروط مقطوع بشكل غير منتظم متجه نحو الجنوب الغربي.

بني هذا المخروط من البوزولانا الطبيعية (السكريا) المؤلفة من مواد فتاتية رمادية سوداء مائلة إلى البني المحمر قاسية تحوي فراغات كثيرة بنسبة 50-70%. تتألف هذه الفتاتات تحت المجهر من زجاج بركاني بالإضافة إلى بلورات متعددة ملونة بأكاسيد مختلفة (الشكل 2-4).

وتستعمل البوزولانا (الطف البركاني المتفتت) في هذه المنطقة في مجالات عديدة كالبناء والزراعة حيث تدخل في صناعة الألواح مسبقة الصنع والبلوك المفرغ وخفيف الوزن. كما تستخدم كمادة عازلة للصوت والحرارة على الأسطح الفاصلة للطوابق السكنية. وفي أعمال الردم ورصف الطرقات... الخ.



الشكل (14-) تل شيحان الحاوي في السويداء الحاوي على البوزولانا الطبيعية



الشكل (24-) قوام ولون البوزولانا الطبيعية المستخدمة في البحث



الشكل (34-) البوزولانا الطبيعية بعد طحنها لدرجة نعومة عالية

تم طحن المواد البوزولانية حتى درجة نعومة لا تقل عن 3000 سم²/غ حسب بلين في مطحنة مخبرية في معمل اسمنت عدرا شكل (3-4)، وذلك قبل استخدامها في صب العينات بفترة قصيرة حتى لا تفقد فاعليتها. يوضح كل من الجدولين (5-4) و (6-4) المواصفات الفيزيائية والكيميائية التي تم الحصول عليها من أجل هذه البوزولانا بحسب نتائج الاختبارات التي أجريت في معمل اسمنت عدرا. ويلاحظ من الجدول (5-4) أن النسبة المئوية لأكسيد السيليسيوم الفعّال 34.62% أكبر من 25% وبالتالي يمكن استخدامها كإضافة بوزولانية على الخلطة الخرسانية (الرفاعي، 2004).

الجدول (5-4) الخواص الفيزيائية للبوزولانا المستخدمة في البحث

| الاختبار | القيمة |
|---|--------|
| الوزن النوعي | 2.83 |
| الوزن الحجمي (كغ/م ³) | 1056 |
| اختبار درجة النعومة حسب بلين (سم ² /غ) | 3018 |
| أكسيد السيلييس الفعال (اختبار الفعالية البوزولانية) | 34.62 |

الجدول (6-4) الخواص الكيميائية للبوزولانا المستخدمة في البحث

| العنصر | النسبة المئوية | اشتراطات |
|--------------------------------|----------------|----------|
| SiO ₂ | 43.04 | 70 ≤ |
| Al ₂ O ₃ | 12.04 | |
| Fe ₂ O ₃ | 14.57 | |
| CaO | 15.7 | |
| MgO | 7.66 | |
| SO ₃ | 0.13 | 3 ≥ |

2-2-4 الملدن:

Superplasticizer

الملدن المستخدم عالي الأداء، خافض للماء، موافق للمواصفة ASTM C-494-Type B، يدخل في تركيبه نفتالين فورمالدهيد (Naphthaline Formaldehyde) و لجنوسلفونيت (lignosulphonate) كثافته 1.2 Kg/m³ خالي من الكلور (chloride free). ولتحديد الجرعة المناسبة تم إضافة عدة جرعات لاختيار الكمية المناسبة وذلك ضمن المجال الذي تفترضه الشركة الصانعة وتم تحديد قابلية التشغيل على عدد من الخلطات التجريبية، وبناءً عليه تم اعتماد كمية من الملدن 0.8% من وزن الاسمنت تم إضافتها أثناء جيل مكونات الخلطات.

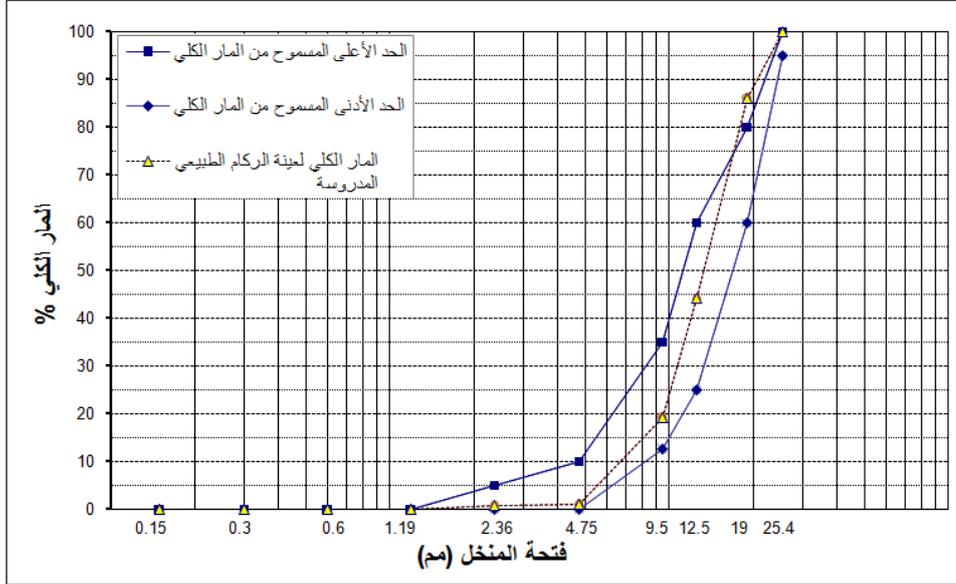
3-2-4 الركام الخشن:

Coarse Aggregate

• الركام الطبيعي:

Natural Aggregate

تم في هذه الدراسة استخدام ركام طبيعي من كسارة بريف دمشق، تم استحضار نوعين من الركام الخشن، ركام فولي وركام عدسي، تم إجراء عملية تنسيب وأخذت نسبة 50% من كلا النوعين للحصول على خليط يحقق حدود المواصفة ASTM C33 كما هو موضح بالشكل (4-4). المقاس الاسمي الأعظمي للخليط الناتج 25 مم.



الشكل (44-) مخطط التحليل الحبي لخليط الركام الطبيعي الخشن المستخدم بالبحث

يظهر الجدول (7-4) الخصائص الفيزيائية والميكانيكية التي تم الحصول عليها بعد إجراء التجارب بحسب المواصفات المعتمدة في مخبر البيتون في كلية الهندسة المدنية والمذكورة ضمن نفس الجدول.

- الركام المعاد تدويره:

The Recycled Aggregate

اعتمدت بعض الأبحاث التي أجريت على نوعين من الركام المعاد تدويره: إما الركام الذي تنتجه وحدات متخصصة بإعادة تدوير نفايات المباني كما عند (Kou, 2005; Abukersh, 2009; Paul, 2011)، أو الركام الناتج عن نفايات المخابرات التي تجرى فيها الأبحاث كما في دراسة (Malešev et al, 2010; Akbari, 2011; Arundebet al, 2011) وجزء آخر اعتمد نفايات من تحضيره وذلك بصب عينات خرسانية وتكسيرها بعد أن تتصلب وإعادة استخدام الركام الناتج عنها (Katz, 2003; Limbachiya et al, 2004; Adnan et al, 2007).

إن تأمين الركام المعاد تدويره وعملية تكسيره وفرز الركام الخشن منه حتى يستخدم في هذا البحث كان أحد الصعوبات التي واجهتنا في هذا العمل، وقد رأى الباحث أن يتم الاعتماد على نفايات مخبر جامعة دمشق كمصدر للركام المعاد تدويره وذلك للمبررات التالية:

1- لا توجد في سورية حتى الآن وحدات متخصصة تقوم بإعادة تدوير نفايات المباني يتوفر فيها آليات متطورة تقوم بعملية التكسير والفرز بحيث نحصل على نوعية مناسبة تحقق الاشتراطات التي توصي بها الكودات بما يتعلق بنسبة الشوائب الواجب مراعاتها.

2- الكسارة التي تم الاعتماد عليها بسيطة يصلح معها تكسير المكعبات الخرسانية والنفايات الخالية من الشوائب والتسليح.

3- كمية العينات التي تم تحضيرها أثناء البحث كبيرة ولا يقبل معه التكسير والفرز اليدوي لنفايات تمثل الواقع. وعليه فقد تم تجميع كمية مناسبة من نفايات مخبر جامعة دمشق ونقلها إلى معمل يحوي كسارة مناسبة (الشكل 4-5).

الجدول (4-7) خواص الركام الطبيعي الخشن المستخدم في البحث

| الحدود حسب المواصفة ASTM C33 | | النسبة المئوية للمار الكلي NA | | | مقاس المنخل بـ مم | الخصائص |
|------------------------------|-------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|-------------------|
| الحد الأعلى | الحد الأدنى | الخليط | الركام العدسي %50 | الركام الفولي %50 | | |
| 100 | 95 | 100 | 100 | 100.00 | 25 | التحليل الحيوي |
| 80 | 60 | 86.02 | 100 | 72.04 | 19 | |
| 60 | 25 | 44.18 | 83.12 | 5.24 | 12.5 | |
| 35 | 12.5 | 19.12 | 37.4 | 0.84 | 9.5 | |
| 10 | 0 | 0.87 | 1.44 | 0.30 | 4.75 | |
| 5 | 0 | 0.62 | 0.94 | 0.30 | 2.36 | |
| حسب المواصفة ASTM C127 | | 2.61 | 2.61 | 2.61 | الجاف | الوزن النوعي |
| | | 2.67 | 2.67 | 2.66 | الجاف مشبع السطح | |
| | | 2.77 | 2.78 | 2.76 | الظاهري | |
| | | 2.20 | 2.34 | 2.00 | الامتصاص % | |
| | | 1335 | - | - | الوزن الحجمي (Kg/m ³) | |
| حسب المواصفة AASHTO T 96-77 | | 19.00 | - | - | الفاقد بالاهتراء % | |



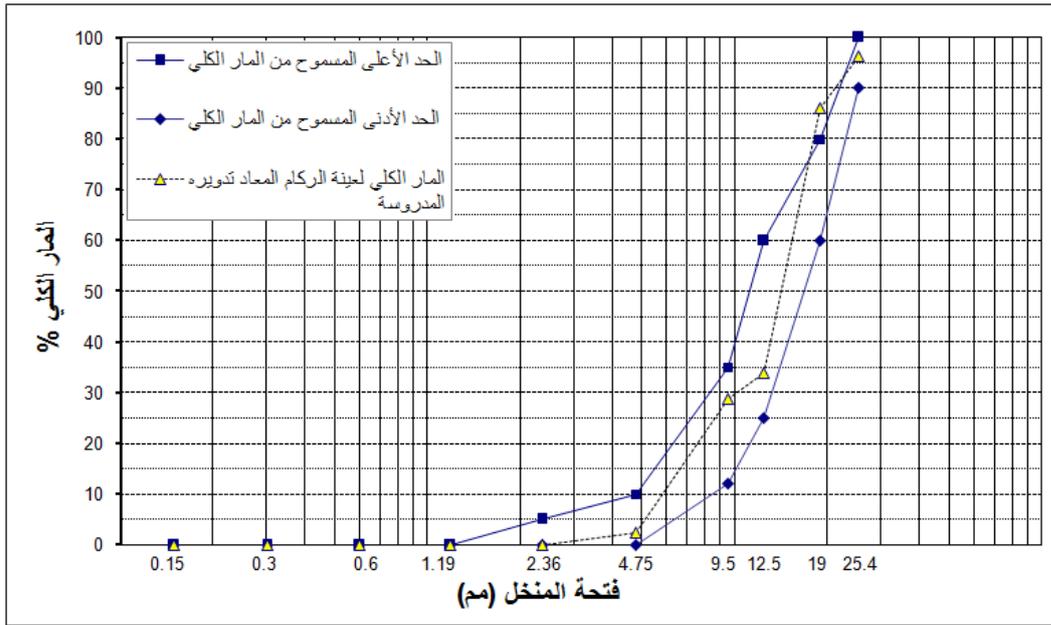
الشكل (4-5) تجميع نفايات مخبر جامعة دمشق ونقلها إلى الكسارة للحصول على RA

تمت عملية فرز ناتج التكسير من خلال إمراره ضمن مجرى اسطواني متحرك يتصل بالكسارة يعمل عمل المنخل مقسم إلى عدة أقسام حسب مقاس الفتحة وبالتالي أمكن استبعاد الركام الناعم والحصول على ركام خشن بثلاث مقاسات أسمية وهي

25م، 19م و 12م كما يوضح الشكل (4-6)، وتم أخذ النسب 35%، 35% و 30% على التوالي للحصول على خليط يحقق المواصفة ASTM C33 (الشكل 4-7).



الشكل (4-6) - الكسارة المستخدمة ونتائج فرز الركام الخشن المعاد تدويره



الشكل (4-7) - التحليل الحبي لخليط الركام الخشن المعاد تدويره المستخدم بالبحث

لم يتم حتى الآن وضع مواصفات لتحديد خواص الركام المعاد تدويره، لذلك اعتمدت معظم الدراسات المواصفات المستخدمة بحالة الركام الطبيعي نفسها لتحديد الخواص المتعلقة بالركام المعاد تدويره، وهذا ما تم اتباعه في هذا البحث عند تحديد الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للركام المعاد تدويره وذلك في مخبر البيتون بجامعة دمشق. يوضح الجدول (4-8) الخواص التي تم إيجادها من أجل RA وكذلك المواصفات المتبعة لتحديدتها.

الجدول (8-4) خواص الخشن الركام المعاد تدويره المستخدم في البحث

| ASTM C33 حدود المواصفة | | النسبة المئوية للمار الكلي RA | | | | مقاس المنخل بـ مم | الخصائص |
|--------------------------------|-------------|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|--------------------------------|------------------|
| الحد الأعلى | الحد الأدنى | الخليط | ركام 3 %30 | ركام 2 %35 | ركام 1 %35 | | |
| 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 37.50 | التحليل الحبي |
| 100.00 | 90.00 | 96.19 | 100.00 | 100.00 | 89.10 | 25.00 | |
| 80.00 | 60.00 | 86.00 | 100.00 | 99.36 | 60.64 | 19.00 | |
| 60.00 | 25.00 | 33.78 | 100.00 | 9.90 | 0.90 | 12.50 | |
| 35.00 | 12.00 | 28.70 | 95.40 | 0.14 | 0.10 | 9.50 | |
| 10.00 | 0.00 | 2.29 | 7.35 | 0.14 | 0.10 | 4.75 | |
| 5.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.94 | 0.10 | 2.36 | |
| حسب المواصفة ASTM C127 | | 2.39 | 2.36 | 2.40 | 2.41 | الجاف | الوزن النوعي |
| | | 2.51 | 2.49 | 2.53 | 2.52 | الجاف مشبع السطح | |
| | | 2.73 | 2.72 | 2.74 | 2.72 | الظاهري | |
| | | 5.15 | 5.52 | 5.18 | 4.79 | الامتصاص % | |
| | | 1270.00 | - | - | - | الوزن الحجمي Kg/m ³ | |
| حسب المواصفة AASHTO T 96-77 | | 32.42 | - | - | - | الفاقد بالاهترءاء % | |

يمكن اعتبار الركام المعاد تدويره الذي تم الحصول عليه من تكسير نفايات المخبر مقبول في تحضير الخلطات الخرسانية، وبحسب التصنيفات المذكورة في الفقرة 3-3 من الفصل السابق فإن الركام المستخدم في البحث يعتبر من الصنف الثاني حسب RELIM, 1994 باعتبار أن نفايات المخبر لم يختلط بها شوائب ونفايات بناء أخرى. كما أنه يعتبر من الصنف منخفض الجودة (Class L) حسب تصنيف (Koji, 2005) في اليابان.

• مقارنة بين خواص الركام الخشن الطبيعي والمعاد تدويره:

Comparison between NA & RA

يوضح الجدول (9-4) قيم بعض البارامترات للركام الطبيعي والركام المعاد تدويره المستخدمين، وبالمقارنة يتبين ما

يلي:

- فيما يخص الكثافة (الوزن النوعي) فإن كثافة الركام المعاد تدويره أقل من كثافة الركام الطبيعي وهذا يتوافق مع ما توصلت إليه الدراسات السابقة كما تم بيانه في فصل المراجعة البحثية.

- بالنسبة للامتصاص فإن الفرق الواضح بين الركام المعاد تدويره والركام الطبيعي، حيث قدرة الركام المعاد تدويره على الامتصاص (5.15%) أكبر بشكل واضح من قدرة الركام الطبيعي على الامتصاص (1.17%) بسبب المونة القديمة الملتصقة على سطح الركام المعاد تدويره والتي تحوي مسامات بنسبة عالية وبالتالي تجعل القدرة على امتصاص الماء أكبر، وهذا الأمر يجب أن يؤخذ بالحسبان أثناء تصميم الخلطات الخرسانية.
- الوزن الحجمي للركام المعاد تدويره أقل بـ 5% من الركام الطبيعي وهذا يتوافق مع ما جاءت به دراسة (Limbachiya et al, 2004) بأن الوزن الحجمي لـ RA يقل بنسبة من 3%-10% عن NA.
- أيضا نتائج الاهتراء تنسجم مع نتائج الدراسة المرجعية التي أوضحت أن مقاومة RA للصدم أقل من NA بسبب المونة الضعيفة الملتصقة به والتي تنتفتت بشكل أسهل وبالتالي تعطي فاقد أكبر. حيث الفاقد بحسب اختبار لوس انجلوس على الركام الخشن بنوعيه RA وNA كان على التوالي 32.42%، 19% وبحسب (الكود السوري، 2004) فإن الحد الأعلى المسموح به للفاقد في اختبار لوس انجلوس هو 40% وبالتالي فإن الركام صالح لإنتاج الخلطات الخرسانية.

الجدول (9-4) مقارنة بين خواص الركام الطبيعي والمعاد تدويره الخشن المستخدم في البحث

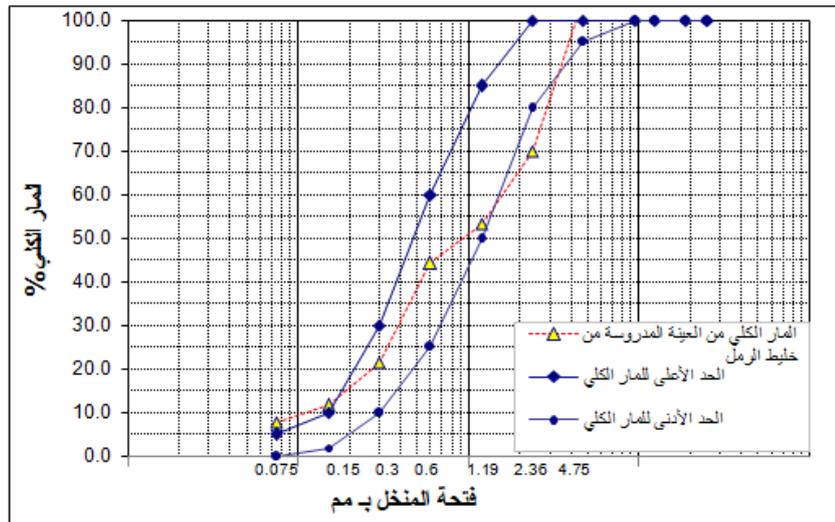
| التجربة | خليط الركام الطبيعي | خليط الركام المعاد تدويره |
|-----------------------------------|---------------------|---------------------------|
| الوزن النوعي (SSD) | 2.67 | 2.51 |
| الامتصاص (%) | 1.17 | 5.15 |
| الوزن الحجمي (Kg/m ³) | 1335 | 1270 |
| الاهتراء (%) | 19 | 32.42 |

4-2-4 الركام الناعم Fine Aggregate

تم في هذه الدراسة اعتماد الركام الناعم الطبيعي فقط وذلك لأن أغلب الدراسات أوصت بعدم استخدام الركام الناعم المعاد تدويره كما تم توضيحه في الفصل المراجعة البحثية الفقرة (3-5-2).

تم اعتماد كسارات ريف دمشق لاستحضار نوعين من الركام الناعم، رمل صلب ورمل مازار، حيث تم استخدام رمل المازار لتعديل خشونة رمل الصب والحصول على خليط من الرمل تدرجه الحبي يقع ضمن التدرج الحبي النظامي ويحقق معامل نعومة مقبول حسب المواصفة ASTM C33، تم إجراء عدة عمليات تنسيب وكانت أفضل النسب هي 75% من رمل صلب و25% من رمل مازار الشكل (4-8).

يوضح الجدول (4-10) المواصفات التي اعتمدت في تحديد الخصائص التي تم الحصول عليها بعد إجراء الاختبارات على كلا الرملين، حيث تم إيجاد التدرج الحبي، معامل النعومة، الوزن النوعي، الامتصاص وأخيرا المكافئ الرملي.



الشكل (84-) التحليل الحبي لخليط الرمل المستخدم بالبحث

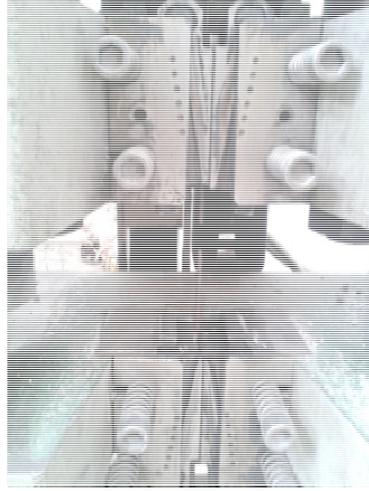
الجدول (10-4) خصائص الرمل المستخدم في البحث

| المواصفة ASTM C33 | | النسبة المئوية للمار الكلي من الرمل | | | مقاس المنخل بـ مم | الخصائص |
|-----------------------------|-------------|-------------------------------------|-----------------|--------------|-------------------|---------------|
| الحد الأعلى | الحد الأدنى | الخليط | رمل المازار %25 | رمل الصب %75 | | |
| 100 | 95 | 100 | 100 | 100.00 | 4.75 | التحليل الحبي |
| 100 | 80 | 64.9 | 99.7 | 53.30 | 2.36 | |
| 85 | 50 | 48.425 | 99.5 | 31.40 | 1.18 | |
| 60 | 25 | 39.55 | 94.3 | 21.30 | 0.60 | |
| 30 | 10 | 19.85 | 29.6 | 16.60 | 0.30 | |
| 10 | 2 | 11.4 | 6.2 | 13.10 | 0.15 | |
| 5 | 0 | 7.55 | 1.7 | 9.50 | 0.075 | |
| 3.1 | 2.3 | 3.16 | 1.71 | 3.64 | معامل النعومة | |
| حسب المواصفة ASTM C127 | | 2.70 | 2.61 | 2.73 | الجاف | الوزن النوعي |
| | | 2.73 | 2.62 | 2.77 | الجاف مشبع السطح | |
| | | 2.79 | 2.65 | 2.84 | الظاهري | |
| | | 1.28 | 0.6 | 1.5 | % الامتصاص | |
| حسب المواصفة AASHTO T 96-73 | | - | | | المكافئ الرملي | |

5-2-4 فولاذ التسليح: *The Steel of Reinforcement*

تم استخدام قضبان فولاذية محلزنة لتسليح بعض العينات، تم اجراء اختبار شد القضبان الفولاذية لأربعة قضبان وايجاد الوسطي لها بواسطة جهاز Controls في مخبر البيتون في الكلية حمولته العظمى 200 طن (الشكل 4-9). يوضح الجدول (4-11) وسطي النتائج التي تم الحصول عليها ومن ضمنها إجهاد الخضوع المساوي لـ 342 N/mm^2 . الجدول (4-11) خصائص التسليح المستخدم في البحث

| حد الانقطاع [N/mm ²] | حد المرونة [N/mm ²] | الاستطالة النسبية | قطر القضيب [mm] |
|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------|--------------------|
| 509.6 | 342.4 | 0.3 | 6 |



الشكل (4-9) جهاز شد الحديد في الدراسة الحالية

3.4 الخلطات الخرسانية: *Concrete Mixes*

تم تحضير ثلاث مجموعات من الخلطات :

- المجموعة الأولى تم استخدام الاسمنت البورتلاندي العادي.
- المجموعة الثانية تم استخدام الاسمنت البورتلاندي العادي مع استخدام البوزولانا الطبيعية كبديل عن الاسمنت بنسبة 15%. حيث يمكن اعتبار الاسمنت الناتج عن هذا الخليط اسمنت بورتلاندي بوزولاني وهو موجود في السوق حالياً.
- المجموعة الثالثة تم استخدام الاسمنت البورتلاندي العادي مع استخدام البوزولانا الطبيعية كإضافة على الخلطة بنسبة 15% من وزن الاسمنت المستخدم.

تم من أجل كل مجموعة أخذ أربع نسب لاستبدال الركام الطبيعي بالركام المعاد تدويره وفق وهي: 0، 50، 75، 100%

وبالتالي فإن عدد الخلطات الكلي هو 12 خلطة. يوضح الجدول (4-12) الترميز الذي تم اعتماده من أجل كل خلطة في هذا البحث.

الجدول (4-12) ترميز الخلطات المعتمدة في البحث

| رمز المجموعة | SI | SII | SIII |
|---|----------|----------|----------|
| نسبة %RA | 0 | 15% | 15% |
| | a-R0PZ | r-R0PZ | a-R0PZ |
| 50 | a-R50PZ | r-R50PZ | a-R50PZ |
| 75 | a-R75PZ | r-R75PZ | a-R75PZ |
| 100 | a-R100PZ | r-R100PZ | a-R100PZ |
| حرف PZ للدلالة على وجود البوزولانا | | | |
| حرف r للدلالة على أن البوزولانا كبديل (replacement) | | | |
| حرف a للدلالة على أن البوزولانا كإضافة (addition) | | | |
| الرقم للدلالة على نسبة استبدال NA بـ RA | | | |

تجدر الإشارة إلى أن اختيار نسبة 15% من وزن الاسمنت للبوزولانا يعود لعدة أسباب هي:

1- تم اعتماد النتائج التي توصلت لها بعض الدراسات المرجعية والتي تؤكد بأن هذه النسبة تعتبر المثلى عندما يراد استبدال الاسمنت البورتلاندي بالبوزولانا في الخرسانة التقليدية بحيث لا تنخفض المقاومة على الضغط (الرفاعي، 2004).

2- وجود عدة معامل في سوريا تصنع اسمنت بورتلاندي بوزولاني بنفس النسبة وبالتالي من السهل استخدامها على أرض الواقع مثل معمل حماة ومعامل لافارج.

3- تعتبر البوزولانا مادة متوفرة بكثرة ورخيصة في سوريا ولها تأثير كبير في تحسين التحميل طويل الأمد وديمومة الخرسانة ومقاومتها للظروف البيئية المحيطة، وبالتالي استخدامها مجدي كإضافة في حالة الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره كونها تزيد من قوة تماسك جزيئات الخرسانة وتقلل من المسامية والنفاذية وبالتالي تزيد من المقاومة لاخترق الأملاح أو الأحماض (Abukersh, 2009).

إن مرد الاستغناء عن دراسة نسب قليلة أدنى من 30% من الركام المعاد تدويره ما أكدت عليه معظم الأبحاث من أن اعتماد هذه النسب لا يؤثر على خصائص الخرسانة الناتجة ونحصل على خرسانة شبيهة بالخرسانة المنتجة من ركام طبيعي (Limbachiya, 2004; Patil et al, 2013; Paul; 2011).

تم اعتماد الطريقة الأمريكية (ACI 211.1-91, 2002) لتصميم الخلطات الخرسانية جميعها بمقاومة اسطوانية مطلوبة مقدارها 29.2 N/mm^2 . مع نسبة $w/c=0.55$. وبعد تحديد الكميات اللازمة حسابياً تم عمل خلطات تجريبية لتحديد الكميات النهائية لمكونات الخلطة والجدول (4-13) يوضح مكونات الخلطات من أجل المجموعات الثلاثة SI و SII و SIII.

الجدول (13-4) مكونات الخلطات للمجموعات المعتمدة في البحث

| المجموعة | RA% | مكونات الخلطة كغ/م ³ | | | | | |
|----------|-----|---------------------------------|---------|------------|-------|---------------|---------------------|
| | | الماء | الاسمنت | البوزولانا | الرمل | البحص الطبيعي | البحص المعاد تدويره |
| SI | 0 | 193 | 350 | 0 | 964 | 868 | 2414 |
| | 50 | 193 | 350 | 0 | 959 | 436 | 2366 |
| | 75 | 193 | 350 | 0 | 958 | 219 | 2341 |
| | 100 | 193 | 350 | 0 | 957 | 0 | 2334 |
| SII | 0 | 193 | 297.5 | 52.5 | 959 | 868 | 2410 |
| | 50 | 193 | 297.5 | 52.5 | 957 | 436 | 2359 |
| | 75 | 193 | 297.5 | 52.5 | 953 | 219 | 2335 |
| | 100 | 193 | 297.5 | 52.5 | 952 | 0 | 2330 |
| SIIS | 0 | 193 | 350 | 52.5 | 914 | 868 | 2420 |
| | 50 | 193 | 350 | 52.5 | 908 | 436 | 2374 |
| | 75 | 193 | 350 | 52.5 | 906 | 219 | 2352 |
| | 100 | 193 | 350 | 52.5 | 906 | 0 | 2340 |

4.4 صب العينات وإنضاجها:

Casting and Curing of Specimens

تم استخدام جباله سعتها 60 ليتر شكل (4-10) لخلط مكونات الخلطات الخرسانية وذلك ضمن شروط المخبر. تم خلط الركام الخشن والناعم والاسمنت وهم بحالة الجافة لمدة دقيقتين قبل إضافة الماء، ثم استمر الخلط مع الماء ثلاث دقائق تقريباً.



الشكل (104-) الجباله المستخدمة لخلط مكونات الخلطات في هذه الدراسة

تم صب عدد من العينات من أجل كل خلطة وهي: مكعبات 150×150×150 مم لتحديد المقاومة على الضغط، اسطوانات 150×300 مم لتحديد المقاومة على الشد بالفلق ومواسير 100×100×300 مم، ومن أجل المجموعة الأولى والثانية من أجل جميع نسب RA ما عدا 75% تم صب جوائز 120×170×120 مم حتى تناسب جهاز اختبار الانعطاف المتوفر في المخبر.

تم ترك العينات في القوالب لمدة 24 ساعة وتم لصق بطاقة توضح تاريخ الصب واسم الخلطة. تم وضع العينات بعد فك القوالب في حوض ماء شكل (4-11) درجة حرارته لم تتجاوز 20 درجة مئوية حتى 28 يوم، أما من أجل الاختبارات بعمر 7 أيام تم إخراج العينات قبل 24 ساعة.



الشكل (114-) حفظ العينات في حوض ماء

يوضح الجدول (4-14) الاختبارات التي تم إجراؤها وعدد العينات اللازمة لذلك وأبعادها وكذلك أيام التي تم فيها إجراء الاختبار.

في هذا السياق تجدر الإشارة إلى ما توصلت له بعض الدراسات (Waleed & Canisius, 2007) بعدم تغير قيم معاملات التصحيح للعينات المختلفة من RAC وأخذها كما في حالة الخرسانة بركام طبيعي.

الجدول (4-14) عدد العينات التي تم صبها والاختبارات التي تم إجراؤها.

| الاختبار | أيام الاختبار | العينة | عدد العينات للخلطة الواحدة | عدد العينات للخلطات |
|-----------------------|---------------|----------------------|----------------------------|---------------------|
| مقاومة الضغط | 7-28-56-120 | مكعب 150x150x150 | 12 | 144 |
| مقاومة الشد بالفلق | 28-120 | اسطوانة 150x300 | 6 | 72 |
| معامل المرونة | 28-120 | موشور 100x100x300 | 12 | 144 |
| انعطاف | 120 | جانز 120x170x1200 | 3 | 18 |
| عدد العينات الكلي | | | | 378 |

5.4 الاختبارات:

The Tests

تم في هذه الدراسة تحديد بعض الخصائص للخرسانة وهي في الحالة الطازجة والمتصلبة وفيما يلي توضيح بسيط لطريقة إجراء الاختبارات.

1-5-4 هبوط المخروط:

The Slump Test

تم استخدام مخروط ابرامز القياسي في تحديد هبوط الخلطة الطازجة، حيث بعد انتهاء الخلط مباشرة تم أخذ كمية من الخرسانة المدروسة بمقدار ثلاثة أضعاف حجم المخروط ووضعها على صفيحة جانبياً. تم اعتماد المواصفة ASTM C 143

في تحديد هبوط المخروط مباشرة بعد الخلط، وبعد ذلك تم تكرار الاختبار كل 15 دقيقة تقريباً حتى فقدان قابلية التشغيل مع هبوط مقداره 5-10 مم (الشكل 4-12). مع العلم أنه تم تغطية الخلطة الخرسانية في الفترة الفاصلة بين كل اختبارين حتى يتم حفظ الرطوبة ومنع التبخر.



الشكل (124-) قياس هبوط المخروط مع الزمن

2-5-4 المقاومة على الضغط *The compressive Strength*

تم اعتماد المواصفة ASTM C 39 لتحديد المقاومة على الضغط وتم استخدام الجهاز الموجود في مخبر البيتون بجامعة دمشق الموضح بالشكل (4-13) وهو من ماركة ELE حمولته العظمى 200 طن. تم وضع العينة بين مكبسين علوي وسفلي، حيث يتحرك الفك السفلي باتجاه الأعلى مطبقاً قوة ضاغطة على العينة أثناء التجربة كون ضغط الزيت موصولاً إليه بينما يبقى الفك العلوي ثابتاً. معدل تطبيق الحمولة هو $6\text{Kg/cm}^2/\text{sec}$ من أجل العينات المكعبية $150*150*150$ مم. تم أخذ القراءة الخاصة بحمولة انهيار العينة من شاشة موجودة أعلى الجهاز وتم حساب مقاومة العينة على الضغط بالعلاقة (4-1):

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (1-4)$$

حيث σ_c إجهاد الضغط الناتج (N/mm^2)، P الحمولة العظمى التي انهارت عندها العينة (N) و A : مساحة مقطع العينة المعرضة للضغط (mm^2).



الشكل (134-) جهاز تحديد مقاومة الضغط للعينات المكعبة في هذه الدراسة

3-5-4 مقاومة الشد الغير مباشر بالفلق: *The Splitting Tensile Strength*

تم اعتماد المواصفة 11 – ASTM C496 / C496M لتحديد المقاومة على الشد بالفلق في العمرين 28 و120 يوم بواسطة جهاز في مخبر البيتون في جامعة دمشق تصنيع Controls حملته العظمى 100 طن (الشكل 4-14). تم قراءة الحمولة التي تنفلق فيها الاسطوانة وتم تحديد مقاومة الشد بالفلق من العلاقة التالية: 120.

$$f_{sp} = \frac{2P}{\pi \cdot d \cdot L} \quad (2-4)$$

حيث يرمز بـ P إلى حمل الكسر الناتج، ويرمز بـ L إلى طول العينة (L=300mm) أما d فهي قطر العينة (d=150mm).



الشكل (144-) جهاز المستخدم لتحديد مقاومة الاسطوانات على الفلق

4-5-4 معامل المرونة:

The Elastic Modulus

يتغير معامل المرونة لمادة الخرسانة تبعاً لتغير المواد الأولية الداخلة في تركيب الخلطة الخرسانية، ولتحديد تأثير الركام المعاد تدويره على معامل المرونة تم إجراء تجارب في مخبر كلية الهندسة المدنية على مواشير أبعادها 100x100x300 مم حيث استخدمت قوالب لا تقل النسبة بين الارتفاع إلى العرض عن 2 بحسب ما تشترطه المواصفة ASTM C 469 (كزبري، 2004).

توصي أغلب المواصفات العالمية باستخدام عينات أسطوانية 100x300 مم لتحديد معامل المرونة وبسبب عدم توفر الأجهزة اللازمة لإجراء الاختبار تم الاستعاضة عن الاسطوانة بموشور، وهذا الأمر تم اعتماده من قبل عدد من الدراسات نذكر منها (Bocca& Crotti, 2002, Antonaci& Bocca,2002, Krizova& Hela,2011, Zámečník et al, 2008) حيث تم استخدام مواشير بأبعاد مختلفة لتحديد معامل المرونة، كما اعتمد في أبحاث (Magureanu et al, 2009,) (Abukersh,2009) مواشير بأبعاد مواشير البحث.

تم في هذا البحث تصنيع حوامل تثبت عليها ساعات قياس التشوه، سبب ذلك عدم توفر تجهيزات تسمح بقياس قيمة التشوه الطولي الحاصل بين نقطتين عند تطبيق الحمل، وتم استخدام مادة الإيبوكسي في عملية لصق هذه الحوامل على سطح العينة الموشورية التي تم اعتمادها كون سطوحها مستوية ويسهل معها لصق الحوامل (الشكل 4-15)،.



الشكل (154-) لصق الحوامل على أسطح المواشير من أجل اختبار معامل المرونة

تتلخص الطريقة المتبعة بحف وتنظيف الوجوه الجانبية الأربعة ومن ثم تحديد نقطتي مكان تثبيت الحوامل بمسافة فاصلة L بعد ذلك تم لصق الحوامل مكان النقاط المحددة باستخدام مادة الأيبوكسي الخاصة بلصق المعدن مع الخرسانة، تلا ذلك تثبيت ساعات قياس التشوه وهي بدقة 0.01 مم، تم استخدام الجهاز نفسه المستخدم في تحديد مقاومة الضغط وقبل وضع العينة بين فكيه والبدء بالتحميل تم ضبط الساعات جميعاً عند الصفر (الشكل 4-16).

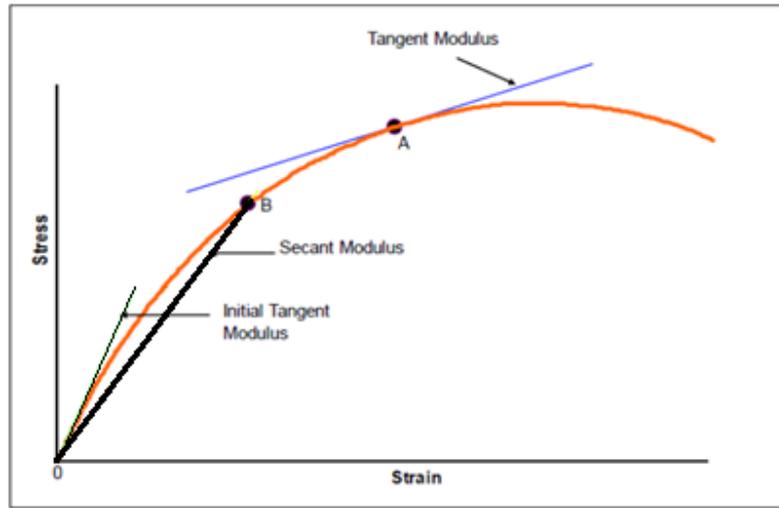
تم تطبيق حمل لا يتجاوز 0.3 من حمل الانكسار في بداية الاختبار للتأكد من مركزية الحمل والتشوه المتساوي للعينة في كافة الاتجاهات حيث أن معدل التحميل المطبق 6Kg/cm²/sec، ومن ثم تم البدء بأخذ قراءات الحمل مع التشوه.



الشكل (164-) اختبار معامل المرونة في هذه الدراسة

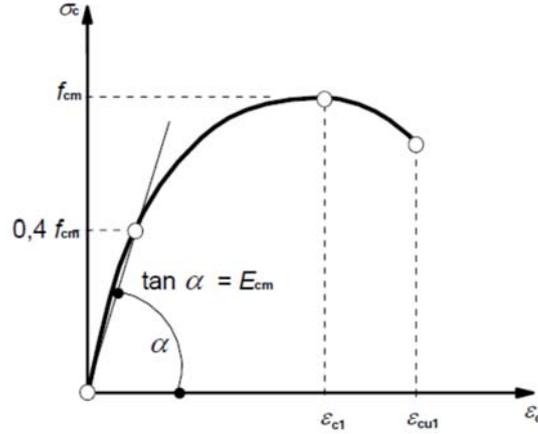
إن لمعامل المرونة في الخرسانة قيم متغيرة تبعاً لدرجة التحميل ويتم التمييز بين عدة قيم لمعامل المرونة وفق المعايير التالية (الشكل 4-17):

- معامل المرونة المرن المماسي الأولي وذلك عند بدء التحميل.
- معامل المرونة المماسي اللحظي وهو ميل المماس لخط عمل المادة عند نقطة تحميل معينة.
- معامل المرونة القاطع (الوسطي) وهو ميل المستقيم الواصل بين مبدأ الإحداثيات وبين نقطة من خط عمل المادة



الشكل (174-) يوضح معاملات المرونة الثلاث.

تم في هذا البحث حساب معامل المرونة القاطع لجميع الخلطات من خلال إيجاد ميل المستقيم الواصل بين مبدأ الإحداثيات وبين النقطة الموافقة لإجهاد ضغط مساوي لـ $0.4f_{cm}$ وذلك بحسب ما جاء به الكود الأوروبي (Eurocode, 2004) (الشكل 4-18)، حيث f_{cm} هي المقاومة المتوسطة الأعظمية على الضغط والذي تم تحديدها مسبقاً من خلال كسر ثلاثة مواشير لكل خلطة وأخذ الوسطي لهم.



الشكل (184-) منحنى إجهاد تشوه حسب الكود الأوروبي (Eurocode, 2004)

تم تسجيل التشوه المقابل لكل زيادة في الحمل مقدارها 1 طن، كما تم حساب إجهاد الضغط بتقسيم الحمل على مساحة المقطع، وعند إجهاد مقداره $0.4f_c$ تم تحديد معامل المرونة القاطع E_c وفق العلاقة:

$$E_c = \frac{0.4 f_c}{\varepsilon_c} \quad (3-4)$$

ε_c هو التشوه النسبي الناجم عن كل قوة ضغط ويحسب من العلاقة:

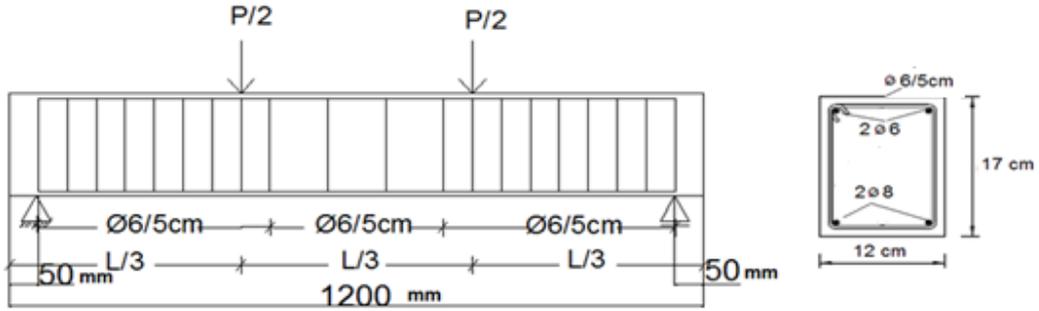
$$\varepsilon_c = \frac{\Delta L}{L} \quad (4-4)$$

حيث L البعد بين النقطتين التي يحسب بينهما التشوه و ΔL التشوه المقابل لإجهاد مقداره $0.4f_c$.

5-5-4 اختبار الانعطاف The Flexural test

تعتبر معرفة أثر الركام المعاد تدويره على سلوك الجوائز المعرضة للانعطاف أمراً هاماً لتقييم إمكانية استخدام هذه المادة في العناصر الإنشائية. في ضوء ذلك تم في هذا الدراسة إجراء اختبار انعطاف لجوائز RA0، RA50، RA100 من المجموعة SI و SII لتحديد الحمولة العظمى والسهم الحاصل في منتصف مجاز الجوائز والمقارنة بينها.

يُظهر الشكل (19-4) رسماً توضيحياً لمقطع طولي وعرضي في الجائز المختبر. مجازه 1200 مم وبأبعاد مقطع 170x120 مم، سماكة التغطية (cover) لحديد التسليح السفلي والعلوي 20 مم، حديد التسليح الطولي (Longitudinal reinforcement) السفلي $\phi 8$ mm والعلوي $2\phi 6$ mm بإجهاد خضوع (Yield stress) 340 MPa، استخدم حديد تسليح عرضي (Stirrups) بقطر $\phi 6$ mm وإجهاد خضوع 275 MPa تم توزيعه بحسب ما هو موضح في الشكل (19-4).



الشكل (194-) رسم توضيحي لمقطع طولي وعرضي في الجانز المختبر.

تم تفصيل قوالب خشبية من أجل صب الجوائز بأبعاد 1200*170*120 مم، كما تم تحضير كوفراج الحديد وفقاً لتفاصيل التسليح المطلوبة (الشكل 4-20).



الشكل (204-) القوالب الخشبية وكوفراج الحديد للجوائز المختبرة.

تم مسح وجوه القوالب بزيت خاص وصب الخرسانة فيهم على ثلاث مراحل مع الدك حتى لا يظهر التعشيش وبعد الانتهاء من الصب سوي السطح ووضع بطاقة توضح اسم الخلطة، ثم فُكَّت القوالب بعد 24 ساعة واستمر ترطيب الجوائز بالماء مع تغطيتها بقطع قماش مبللة حتى اليوم 28 ومن ثم ترك العينات في شروط المخبر حتى يوم الاختبار. يوضح الشكل (4-21) بعض الجوائز بعد الصب وخلال حفظها في المخبر.

لإجراء تجربة الانعطاف استخدم الجهاز الموجود في مخبر البيتون بجامعة دمشق والمزود بمكبس هيدروليكي صغير في أعلاه يمكنه تطبيق حمولة أعظمية 120 KN، تم نقل هذه الحمولة إلى الجانز بواسطة جانز توزيع معدني مستند على قضيبين معدنيين بحيث تقسم القوة المطبقة من الجهاز إلى قوتين مركزتين ومتساويتين مطبقتان على بعد $L/3$ من المساند، ولقياس السهم المتشكل أثناء الاختبار تم تثبيت ساعة قياس التشوه بدقة 0.01 مم أسفل الجانز في منتصف المجاز. أما شروط الاستناد الطرفية فقد تم تأمينها من خلال تصميم مفصل ثابت وآخر متدرج يبعدان عن بعضهما مسافة فاصلة قدرها 1100 مم. يوضح الشكل (4-22) الجهاز المستخدم أما الشكل (4-23) فيوضح ارتكاز الحمل والساعة المثبتة والمساند المصممة.



الشكل (214-) بعض الجوائز المصبوبة والمحفوظة في المخبر.



الشكل (224-) جهاز اختبار الانعطاف في هذه الدراسة.

تتلخص التجربة بتطبيق الحمل بتزايد $1,7 \text{ KN}$ تقريباً حتى حمولة الانهيار مع أخذ القراءة المقابلة لكل تزايد من أجهزة قياس السهم حتى حدوث انهيار الجائز، تم أخذ القراءات المسجلة ورسم مخطط قوة- انتقال للجوائز المختبرة .



الشكل (234-) كيفية ارتكاز الحمل مع ساعة قياس التشوهات والمساند المصممة.

6.4 الخلاصة:

مما سبق في هذا الفصل نستنتج أنّ خصائص الركام المعاد تدويره التي تم الحصول عليها توافقت إلى حد كبير ما توصلت إليه الدراسات السابقة، وبالتالي تم اعتمادها إضافة لخصائص باقي المواد لتصميم خلطات البحث المقسّمة إلى ثلاث مجموعات وفي كل مجموعة أربع خلطات. سيتم في الفصل القادم عرض وتحليل النتائج التي تم الوصول إليها نتيجة إجراء الاختبارات المذكورة سابقاً والمتمثلة بمقاومة الضغط، الشد بالفلق، معامل المرونة والانعطاف سواء باستخدام الركام المعاد تدويره لوحده أو مع البوزولانا.

الفصل الخامس

الدراسة التجريبية على خرسانة منتجة من ركام معاد تدويره *The Experimental Study of Recycled Aggregate Concrete*

1.5 مقدمة:

Introduction

الغاية من هذا الفصل هو عرض ومناقشة نتائج الاختبارات التي أجريت بحسب البرنامج التجريبي الذي تم توضيحه في الفصل الرابع لدراسة تأثير الركام المعاد تدويره على الخرسانة المنتجة منه.

تم في بداية هذا الفصل مناقشة النتائج الخاصة بخرسانة منتجة من ركام معاد تدويره بدون إضافات والمتمثلة بالمجموعة الأولى SI، حيث تم تحديد قيم هبوط المخروط ومن ثم قيم الوزن الحجمي لها بحالتيه الرطبة والجافة وكذلك عدد من الخصائص الميكانيكية لمعرفة تأثير الركام المعاد تدويره عليهم عندما يستخدم بنسب مختلفة.

تم في هذا الفصل أيضاً مناقشة النتائج الخاصة بالمجموعة الثانية SII حيث تم استخدام البوزولانا الطبيعية كبديل عن الاسمنت بنسبة 15% من وزن الاسمنت، وكذلك النتائج الخاصة بالمجموعة الثالثة SIII حيث كانت البوزولانا كإضافة على الخلطة الخرسانية بنسبة 15% من وزن الاسمنت. وبحيث تم تقييم أثر هذه المادة على خصائص الخرسانة الميكانيكية مع وجود الركام الخشن المعاد تدويره كبديل جزئي أو كلي فيها.

الجدير بالذكر أنه تم استخدام الملدن لتأمين قابلية التشغيل المطلوبة ولتسهيل عملية الصب وتم اعتماد نفس الكمية من الملدن في جميع الخلطات حتى لا يكون الملدن متغير يؤثر في المقارنة بين الخلطات.

يوضح الجدول (5-1) التجارب التي تم إجراؤها لكل مجموعة من المجموعات السابقة والتي سيتم مناقشتها تباعاً.

الجدول (5-1) التجارب التي تم إجراؤها من أجل كل مجموعة

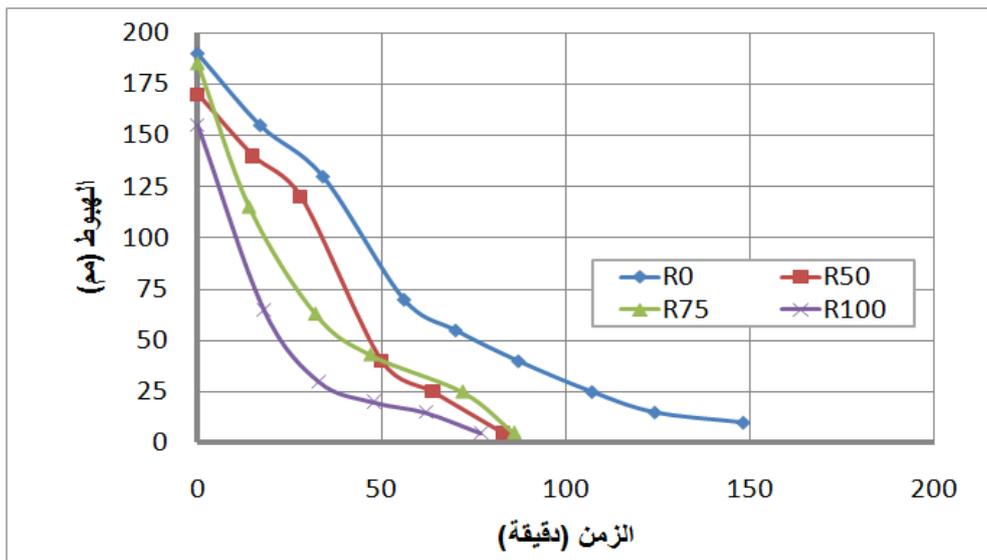
| الاختبار | المجموعة |
|--------------------|-----------------|
| هبوط المخروط | SI |
| الوزن الحجمي | SIII ، SII ، SI |
| مقاومة الضغط | SIII ، SII ، SI |
| مقاومة الشد بالفلق | SIII ، SII ، SI |
| معامل المرونة | SIII ، SII ، SI |
| اختبار الانعطاف | SII ، SI |

2.5 خصائص الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره بدون إضافات بوزولانية (المجموعة SI): *The Properties of RAC without Pozzolanic Additions (Series SI)*

1-2-5 قابلية التشغيل (هبوط المخروط) : *The Workability (The Slump)*

يبين الشكل (1-5) قيم هبوط المخروط مع الزمن حيث كل قيمة في المخطط هي وسطي قرانئين. يتضح من الشكل أن هبوط المخروط يقل كلما زادت نسبة الركام المعاد تدويره في الخلطة، فالخلطة المحضرة من 100% من RA أعطت أقل هبوط بعد الخلط مقداره 155 مم، في حين أن الخلطة المحضرة من الركام الطبيعي فقط أعطت هبوط بعد خلط المكونات قدره 190مم. ويعود ذلك إلى المسامية العالية للمونة القديمة الملتصقة على سطح الركام المعاد تدويره والتي تجعله يمتص الماء المحيط به بشكل أسرع بالمقارنة مع الركام الطبيعي، أيضا شكل حبات الركام المعاد تدويره ذو الزوايا الحادة الكثيرة وكذلك الملمس الخشن لسطحها ووجود الغبار نتيجة التكسير يلعب دور كبير في خفض قابلية التشغيل للخلطة التي تحوي على مثل هذا النوع من الركام. هذا الأمر أوضحته كثير من الدراسات مثل (Adnan et al, 2007; Vyas& Bhatt, 2013; Limbachiya et al, 2004).

يظهر من الشكل (1-5) أيضا أن الزمن اللازم لفقدان قابلية التشغيل يقل مع زيادة نسبة RA في الخلطة، حيث تتطلب الوصول إلى هبوط مقداره 5 مم في R100 زمن مقداره 80 دقيقة في حين أن الوصول إلى 5 مم في R0 تتطلب تقريبا 150 دقيقة أي حوالي الساعتين والنصف، وذلك يعود أيضا لبنية وشكل الركام المعاد تدويره. يمكن ملاحظة من الشكل (1-5) أيضا أن الخط البياني الممثل لهبوط المخروط مع الزمن الخاص بخلطة R50 كان أقرب لـ R0 من بدايته وحتى مرور زمن قدره 40 دقيقة، بعد ذلك يصبح الخط أقرب للخطين البيانيين الممثلين لهبوط المخروط للخلطتين R75 و R100 مع الزمن. يمكن الاستفادة من هذا الأمر في حالة الصب في الموقع وعدم الحاجة لزمن طويل لإنهاء الصب حيث أن قابلية التشغيل لـ R50 و R0 كانت متقاربة لحد ما عندما لا لم تزد الفترة عن 40 دقيقة.

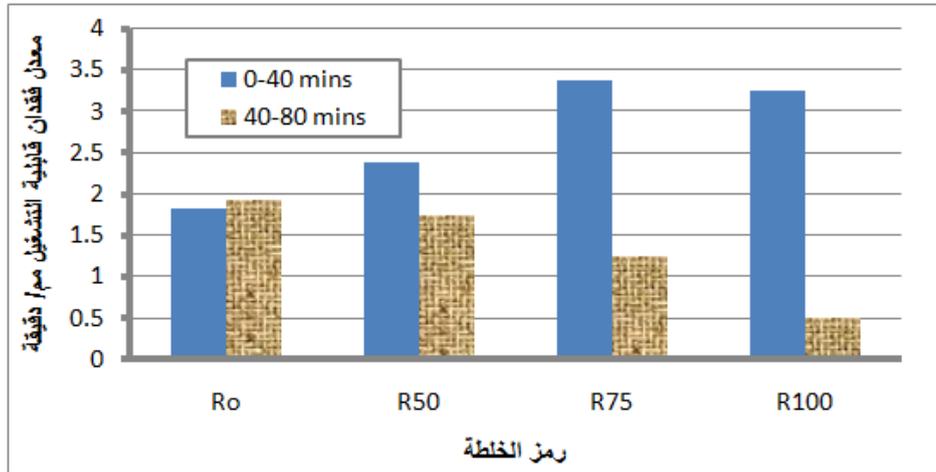


الشكل (15-) قيم هبوط المخروط مع الزمن

يوضح الشكل (2-5) سرعة فقدان قابلية التشغيل للمجموعة SI، حيث تم حساب سرعة فقدان قابلية خلال فترتين 40 و80 دقيقة. يتضح من الشكل (2-5) أن سرعة فقدان قابلية التشغيل في فترة 40 دقيقة الأولى تزداد مع زيادة نسبة الركام المعاد تدويره، فمن أجل R100 كان معدل فقدان قابلية التشغيل 3.25 مم/دقيقة، في حين أنه 1.83 مم/دقيقة من أجل R0، يفسر ذلك بأن الركام المعاد تدويره استخدم وهو في الحالة الجافة وبسبب وجود المونة الملتصقة على سطحه ذات المسامية العالية والشقوق الشعرية فإن امتصاصه للماء المحيط به كان أعلى وأسرع وهذا يوافق ما جاء به (Kou, 2005).

كما نلاحظ أيضاً أنه عندما يستخدم الـRA فإن سرعة فقدان قابلية التشغيل خلال الأربعين دقيقة الأولى أكبر عنه خلال الزمن الفاصل بين 40-80 دقيقة من بدء هذا الاختبار ويظهر هذا بشكل جلي عندما تزداد نسبة RA المستخدمة كما في R100 و R75. حيث من أجل R100 كانت سرعة فقدان قابلية التشغيل في أول 40 دقيقة 3.25 مم/دقيقة في حين أنها أصبحت 0.5 مم/دقيقة في 40 دقيقة التالية، ويعود ذلك إلى أن المؤثر الأهم في فقدان قابلية التشغيل وهو امتصاص الماء من قبل الركام المعاد تدويره لماء أغلب مساماته خلال الأربعين دقيقة الأولى، وبعد هذا الزمن يصبح امتصاص الماء بطيء وبالتالي سرعة فقدان قابلية التشغيل تنخفض.

ما يجدر ذكره هنا أن الهبوط بعد الخلط مباشرة والذي أعطته الخلطة R75 كان أعلى من R50 وهذا يشير إلى وجود كمية إضافية من الماء نتيجة خطأ إما أثناء تجفيف العينات أو أثناء معايرة وزن الماء، وبالتالي فإن قيمة W/C تغيرت في هذه الخلطة الأمر الذي أثر على النتائج الخاصة بمقاومات الضغط لـR75 وعلها قريبة جداً من مقاومات R100 كما ستظهر النتائج لاحقاً.



الشكل (2-5) سرعة فقدان قابلية التشغيل للمجموعة SI

2-2-5 الوزن الحجمي:

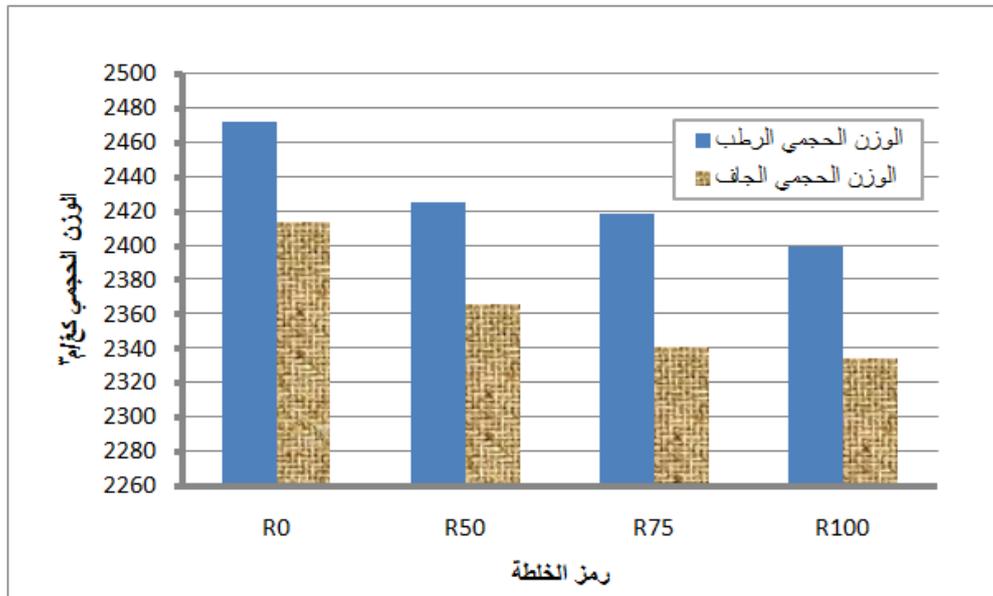
The Density

تم تحديد قيم الأوزن الحجمية لخلطات المجموعة SI وفق المواصفة ASTM C 138 وإدراجها في الجدول (2-5) وهي بالحالة الرطبة بعد الصب مباشرة وكذلك الوزن الحجمي الجاف عند اليوم 28 حيث كل قيمة هي وسطي ثلاثة قيم، ويوضح الشكل (3-5) هذه القيم ونلاحظ بأن الوزن الحجمي بحالتيه الرطبة والجافة يقل مع زيادة نسبة الركام المعاد تدويره في الخلطة، حيث أعطت R0 وزن حجمي رطب 2472 Kg/m^3 في حين أعطت R100 وزناً

حجماً قدره 2400 Kg/m^3 ، أي أن الانخفاض الحاصل كان بمقدار 3%. انخفض الوزن الحجمي الجاف أيضاً بنسبة 3% عند استخدام الركام المعاد تدويره بنسبة 100% أيضاً حيث من أجل R0 كان 2414 Kg/m^3 ومن أجل R100 كان 2336 Kg/m^3 ، ويعود ذلك إلى أن الوزن الحجمي للركام المعاد تدويره أقل من الوزن الحجمي للركام الطبيعي. إن هذه النتيجة تنسجم مع النتائج التي جاءت بها الدراسات السابقة حيث حددت بعض الدراسات التغير في الوزن الحجمي عند استخدام RA بنسبة تتراوح بين 3-10% (Limbachiya et al, 2004). يلاحظ من مقارنة الوزن الحجمي الرطب والجاف لأي خلطة بأن الفارق لم يتجاوز 100 Kg/m^3 وهذا موافق لما أكدت عليه معظم الدراسات من أن الوزن الرطب يمكن حسابه بطرق مبسطة من خلال إضافة 100 Kg/m^3 للوزن الحجمي الجاف (NCS,2009).

الجدول (25-) قيم الأوزن الحجمية لخلطات المجموعة SI

| الوزن الحجمي الجاف (Kg/m ³) | الوزن الحجمي الرطب (Kg/m ³) | الخلطة |
|--|--|--------|
| 2414 | 2472 | R0 |
| 2366 | 2425 | R50 |
| 2341 | 2419 | R75 |
| 2334 | 2400 | R100 |



الشكل (35-) الوزن الحجمي بحالتيه الرطبة والجافة

3-2-5 مقاومة الضغط: Compressive Strength

يوضح الجدول (3-5) قيم مقاومات الضغط عند الأعمار المدروسة من أجل النسب الأربعة من RA للمجموعة SI، حيث كل قيمة هي وسطي ثلاث قيم.

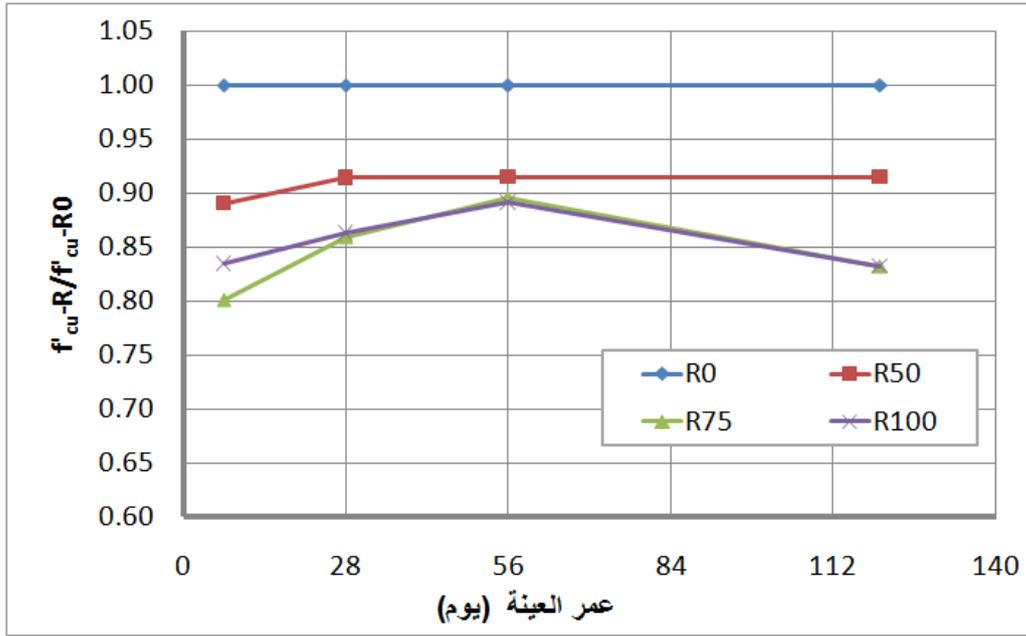
الجدول (3-5) قيم مقاومات الضغط عند الأعمار المدروسة من أجل النسب الأربعة من RA

| مقاومة الضغط للمجموعة الأولى (N/mm ²) | | | | نسبة RA % | رمز الخلطة |
|---|------|------|------|-----------|------------|
| اليوم | | | | | |
| 120 | 56 | 28 | 7 | | |
| 45.9 | 40.5 | 37.1 | 27.6 | 0 | R0 |
| 42.0 | 37.1 | 34.0 | 24.6 | 50 | R50 |
| 38.2 | 36.3 | 31.9 | 22.1 | 75 | R75 |
| 38.2 | 36.1 | 32.0 | 23.0 | 100 | R100 |

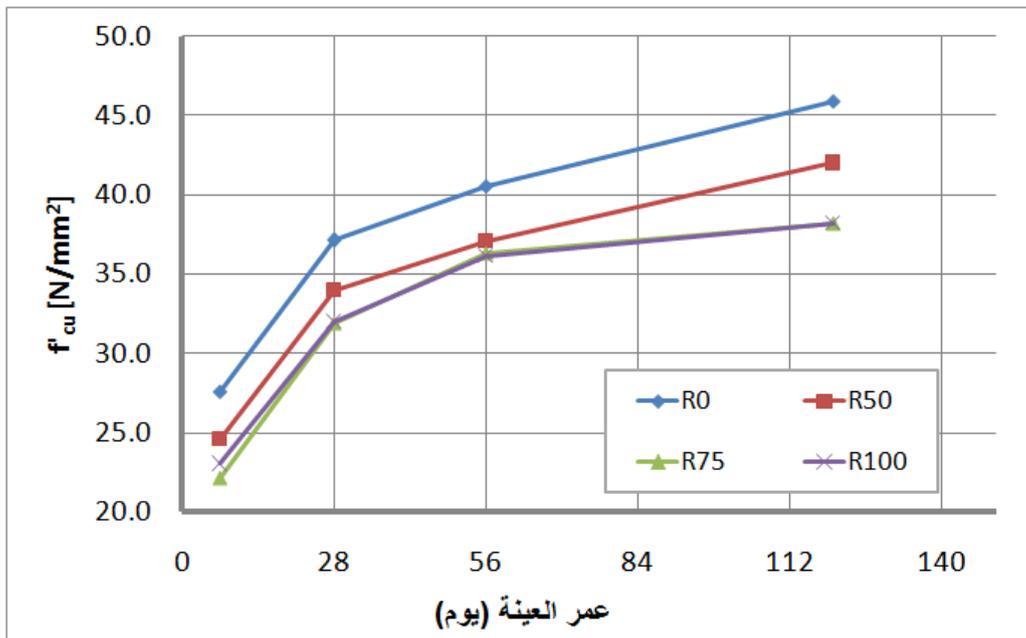
يظهر من الجدول (3-5) بأنه كلما زادت نسبة الركام المعاد تدويره كلما انخفضت مقاومة الضغط وذلك من أجل جميع الأعمار المدروسة.

يوضح الشكل (4-5) مقاومات الضغط المكعبية f_{cu} من أجل كل عمر من الأعمار المدروسة منسوبة إلى مقاومة الضغط للخلطة R0 عند ذلك العمر. يلاحظ من هذا الشكل بأن R50 حققت مقاومات للضغط بفارق 10% تقريباً عن مقاومة الضغط لـ R0 عند كل الأعمار، في حين أن مقاومات الضغط لـ R75 و R100 والتي أعطت نتائج متقاربة كانت أخفض بـ 14%، 11%، 17% عن مقاومة الضغط لـ R0 في الأيام 28، 56، 120 على التوالي. يفسر (Tam et al.2004) هذا الاختلاف في السلوك بين RA 50 و RA100 بأنه مع التقدم بالعمر تزداد مقاومة الضغط للعجينة الاسمنتية الجديدة وتصبح المنطقة الانتقالية بين سطح الركام المعاد تدويره والعجينة الاسمنتية القديمة الملتصقة على سطحه نقطة ضعف في النسيج الخرساني، مما يجعل الزيادة في المقاومة مع الزمن عند استخدام نسب عالية من الركام المعاد تدويره أقل مما هي عليه في الركام الطبيعي أو عند استخدام خليط بنسب لا تتجاوز 50% للركام المعاد تدويره. تتضح هذه الظاهرة أيضاً في الشكل (5-5) الذي يوضح تطور مقاومة الضغط مع الزمن من أجل خلطات المجموعة SI، فمن أجل R75 و R100 فإن مقدار الكسب في المقاومة يصبح أقل بعد اليوم 56، ويعبر عنه النقصان في ميل الخط الواصل بين النقطة الثالثة والرابعة من المنحني R75 و R100.

أما الشكل (5-5) فيبين أيضاً أنه على الرغم من اختلاف نسبة الركام المعاد تدويره إلا أن هناك تقارب في تطور المقاومة مع الزمن وخاصة من أجل R0 و R50 .



الشكل (45-) مقاومات الضغط المكعبية f'_{cu} من أجل كل عمر من الأعمار المدروسة منسوبة إلى مقاومة الضغط للخلطة R0 عند ذلك العمر



الشكل (55-) تطور مقاومة الضغط مع الزمن من أجل خلطات المجموعة SI

4-2-5 مقاومة الشد بالفلق: Splitting Tensile Strength

يوضح الجدول (4-5) قيم الشد بالفلق للمجموعة SI في اليومين 28 و120، حيث كل قيمة هي وسطي ثلاث قيم. تم وضع قيم الشد المباشر في الجدول والتي تحسب وفق (الكود السوري الطبعة الثالثة، 2004) بعد الضرب بالعامل 0.85.

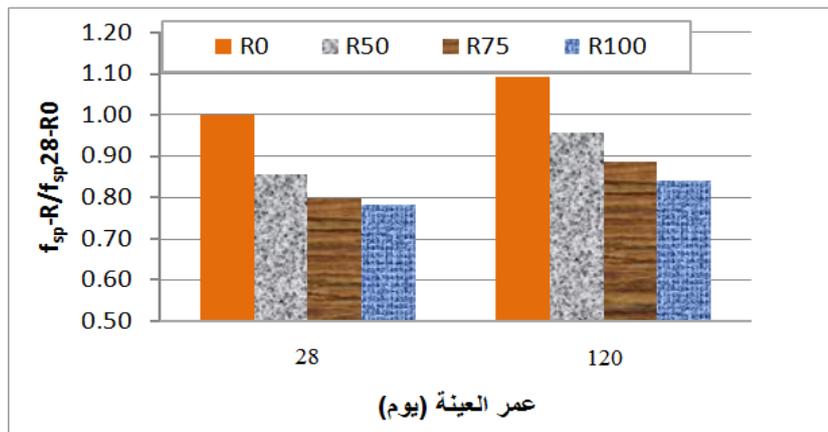
الجدول (45-) قيم الشد بالفلق والشد المباشر للمجموعة SI

| مقاومة الشد (N/mm ²) في اليوم | | مقاومة الشد بالفلق (N/mm ²) في اليوم | | نسبة %RA | رمز الخلطة |
|---|------|--|------|----------|------------|
| 120 | 28 | 120 | 28 | | |
| 2.56 | 2.35 | 3.01 | 2.76 | 0 | R0 |
| 2.24 | 2.01 | 2.64 | 2.36 | 50 | R50 |
| 2.08 | 1.87 | 2.45 | 2.20 | 75 | R75 |
| 1.97 | 1.84 | 2.32 | 2.16 | 100 | R100 |

يلاحظ من الجدول (4-5) أنه مقاومة الشد تنخفض كلما زادت نسبة الركام المعاد تدويره وذلك في كلا العمرين المدروسين وسبب ذلك الجودة المنخفضة للركام التي أثرت على أداء RAC على الشد. وضع نسبة مقاومة الشد بالفلق إلى مقاومة الشد بالفلق لـ R0 في اليوم 28 موضحة في الشكل (5-6)، تُظهر النتائج بأن الانخفاض في مقاومة الشد بالفلق في اليوم 28 بالمقارنة مع خلطة بركام طبيعي من أجل R50، R75، R100 كان 14%، 20%، 22% على التوالي. هذه النتائج تتسجم مع ما توصل له (Abukersh, 2009) حيث توصل لانخفاض بمقاومة الشد بالفلق من أجل 100% من الركام المعاد تدويره بمقدار 23% بالمقارنة مع خلطة بـ 100% من الركام الطبيعي وذلك في اليوم 28.

ما يجدر التنويه له هنا أن الركام المستخدم لم يتم غسله بالماء قبل استخدامه وبالتالي قد يكون هذا سبب في خفض مقاومات الشد بالفلق لـ RAC حتى 22%، هذا الأمر أشار له (Dabhade et al, 2013) حيث بيّن أن استخدام الركام المعاد تدويره بدون غسله من الغبار العالق على سطحه نتيجة التكسير ساهم في تخفيض مقاومة الشد بالفلق لأنه خفّض من إجهادات التماسك التي تنتقل بين سطح الركام وبين العجينة الاسمنتية المحيطة. وقد أظهرت دراسات أخرى كدراسة (Murali et al, 2012) أنه عند المعالجة بالنقع المسبق بالماء ترتفع مقاومة الشد بمقدار 3%.

يظهر من الشكل (5-6) أن مقاومات الشد بالفلق في اليوم 120 قد تحسّنت من أجل جميع نسب الـ RA المستخدمة بنسبة تتراوح بين 7 و 9%، وهذا أمر تم لحظه في بعض الدراسات كدراسة (Kou, 2005).



الشكل (65-) مقاومة الشد بالفلق منسوبة إلى مقاومة الشد بالفلق لـ R0 في اليوم 28 من أجل SI

5-2-5 معامل المرونة للمجموعة SI: Elastic Modulus for SI

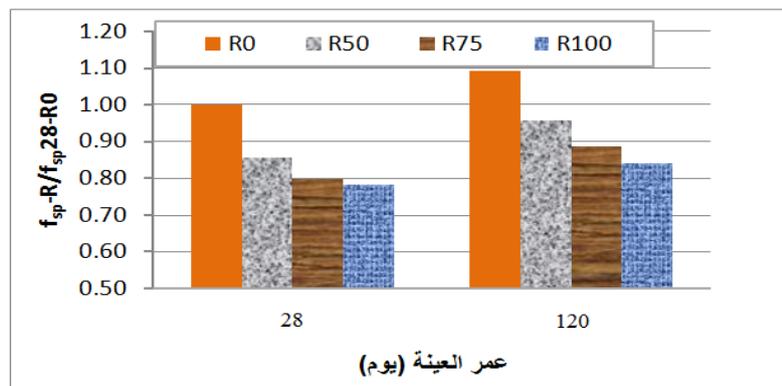
يوضح الجدول (5-5) قيم معامل المرونة للمجموعة SI في اليومين 28 و120، حيث كل قيمة هي وسيط في ثلاث قيم. من الملاحظ زيادة انخفاض معامل المرونة كلما زادت نسبة RA المستخدم في الخلطة وذلك في كلا العمرين المدروسين.

الجدول (5-5) قيم معامل المرونة للمجموعة SI

| معامل المرونة (GPa) في اليوم | | رمز الخلطة | نسبة RA % |
|------------------------------|------|------------|-----------|
| 120 | 28 | | |
| 33 | 30.9 | R0 | 0 |
| 28 | 25.3 | R50 | 50 |
| 24.7 | 22.8 | R75 | 75 |
| 24 | 22.1 | R100 | 100 |

تم في الشكل (7-5) إدراج قيم معامل المرونة لخلطات المجموعة SI منسوبة إلى معامل المرونة لـ R0 في اليوم 28. يظهر من هذا الشكل بأن معامل المرونة يتأثر بشكل واضح عند استخدام الركام المعاد تدويره، ففي اليوم 28 انخفض معامل المرونة بمقدار 28% في R100، 26% من أجل R75، وبمقدار 18% عند R50. فسرت معظم الدراسات الانخفاض الواضح لمعامل المرونة في RAC بقابلية حبات الركام المعاد تدويره إلى التشوه بشكل أكبر عند تعرضها للضغط بالمقارنة مع الركام الطبيعي بسبب وجود المونة القديمة على سطحها والتي تحوي مسامات تعطيها هذه الخاصية، لذلك كلما كان الركام مغلف بكمية أكبر من المونة كلما كان مقدار الانخفاض لمعامل المرونة أكبر. وقد توصلت بعض الدراسات إلى انخفاض بمعامل المرونة وصل حتى 45% مع 100% من RA (Xiao et al, 2005).

في اليوم 120 أبدى معامل المرونة تحسناً في قيمه عند المقارنة مع القيم التي وصل لها في اليوم 28 وذلك من أجل جميع نسب RA في هذه المجموعة، فلقد ارتفع معامل المرونة في R0 بنسبة 7%، أما عندما استخدم الركام المعاد تدويره فإن التحسن كان 9% في كل من R75 و R100، أما من أجل R50 فكان 11% . تعزي معظم الدراسات التحسّن في الخواص الميكانيكية بعد اليوم 28 عند وجود الركام المعاد تدويره في الخلطة إلى استمرار تفاعلات إمهاة الاسمنت الغير متفاعل مع الماء المحتجز ضمن مساماته الأمر الذي يعطي صلابة أكبر للبناء الداخلي للخرسانة (مرزا، 2009).



الشكل (7-5) قيم معامل المرونة لخلطات المجموعة SI منسوبة إلى معامل المرونة لـ R0 في اليوم 28.

3.5 خصائص الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره مع بوزولانا كبديل عن الاسمنت المجموعة SII:

The Properties of RAC with Pozzolana as a Replacement of Cement (Series SII)

توصّل الباحث (الرفاعي، 2004) في دراسته إلى أنّ استخدام البوزولانا الطبيعية بنسبة 15% كبديل عن الاسمنت لا يغير من مقاومة الضغط في اليوم 120 وذلك من أجل الركام الطبيعي. هذا الأمر له فوائد على عدة مستويات بيئية واقتصادية بالإضافة إلى تحسين أداء الخرسانة لذلك تنتج عدد من الشركات اسمنت بورتلاندي بوزولاني بهذه النسبة مستخدم في كثير من التطبيقات وكذلك في عدد من الدراسات المرجعية حول الركام المعاد تدويره مثل (Murali et al, 2012; Dabhade et al, 2013; Kumutha & Vijai, 2010). ولأنّ استعمال البوزولانا مجدي وله عدّة فوائد تم ذكرها في الفقرة 3-8-3 تم في هذا البحث دراسة تأثير الخصائص الميكانيكية في حال اعتمدت هذه النسبة كبديل عن الاسمنت ومقارنتها مع الخصائص التي أمكن الحصول عليها باستعمال الاسمنت البورتلاندي فقط عند استخدام الركام المعاد تدويره.

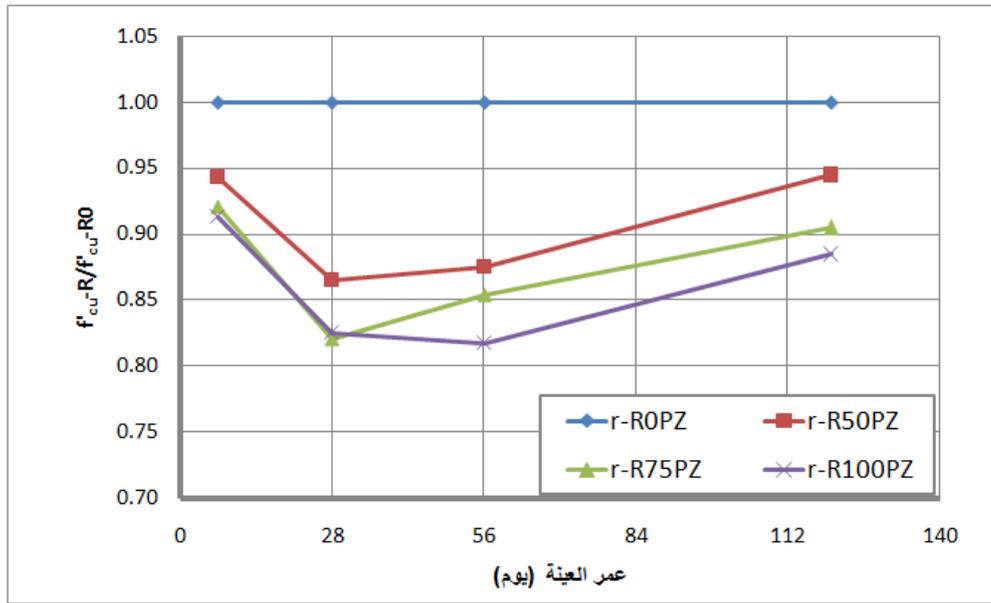
1-3-5 مقاومة الضغط: *Compressive Strength*

يوضّح الجدول (6-5) قيم مقاومات الضغط عند الأعمار المدروسة من أجل النسب الأربعة من RA للمجموعة SII، حيث كل قيمة هي وسطي ثلاث قيم. يظهر من قيم هذا الجدول بأنّ وجود الركام المعاد تدويره مع استخدام البوزولانا كبديل عن الاسمنت قد خفّض من مقاومة الضغط وجعل المقاومات متقاربة على الرغم من اختلاف نسبة RA المستخدم. يمكن تفسير تدني مقاومات الضغط للخلطات الحاوية على RA في اليوم 28 بالمقارنة مع الخلطة من ركام طبيعي في هذه المجموعة بأنّ كمية الاسمنت الموجود في الخلطة الخرسانية الحاوية على ركام معاد تدويره دور كانت أدنى من 300 Kg/m^3 وبما أن سطح هذا الركام أكثر خشونة وتدرجه الحبي غير منتظم بالتالي يجب زيادة كمية الاسمنت حتى تصبح كافية لتغليف كامل حبات الركام، وقد أوصت بعض الدراسات ومنها دراسة (Konin & Kouaido, 2011) أن تكون كمية الاسمنت أعلى من 300 Kg/m^3 ليتم الحصول على مقاومات لـ RAC أفضل بالمقارنة مع مقاومة NAC. لأنّ الاسمنت هو المادة الرابطة الفعّالة والذي يكون له الدور الأكبر حتّى اليوم 28 أما البوزولانا فيظهر أثرها بعد هذا العمر.

الجدول (6-5) قيم مقاومات الضغط عند الأعمار المدروسة من أجل النسب الأربعة من RA للمجموعة SII

| مقاومة الضغط للمجموعة الثانية (N/mm ²) | | | | نسبة %RA | رمز الخلطة |
|--|------|------|------|-------------|------------|
| اليوم | | | | | |
| 120 | 56 | 28 | 7 | | |
| 45.1 | 43.1 | 36.4 | 24.3 | 0 | r-R0PZ |
| 42.6 | 37.7 | 31.5 | 22.9 | 50 | r-R50PZ |
| 40.8 | 36.8 | 29.9 | 22.4 | 75 | r-R75PZ |
| 39.9 | 35.2 | 30.1 | 22.2 | 100 | r-R100PZ |

تم في الشكل (8-5) وضع مقاومة الضغط f'_{cu} من أجل كل عمر من الأعمار المدروسة منسوبة إلى مقاومة الضغط للخلطة r-R0PZ عند ذلك العمر. يظهر من الشكل أنه كلما زادت نسبة الركام المعاد تدويره كلما انخفضت مقاومة الضغط. حيث بالمقارنة مع r-R0PZ يظهر أن r-R50PZ و r-R75PZ و r-R100PZ انخفضت بمقدار 14%، 18%، 17% على الترتيب. تقلص الفارق في اليوم 120 وأصبح يتراوح بين 6% حتى 12% وهذا يعود إلى أن البوزولانا تحتاج إلى وقت حتى تتفاعل حيث أن ارتباط المادة الفعالة فيها بأوكسيد الكالسيوم الناتج عن إمهاء الاسمنت يأتي كمرحلة ثانية وبالتالي تمام تفاعلها يأتي بعمر متأخر، كما أن وجود الركام المعاد تدويره ساهم في تنشيط واستمرار هذه التفاعلات.



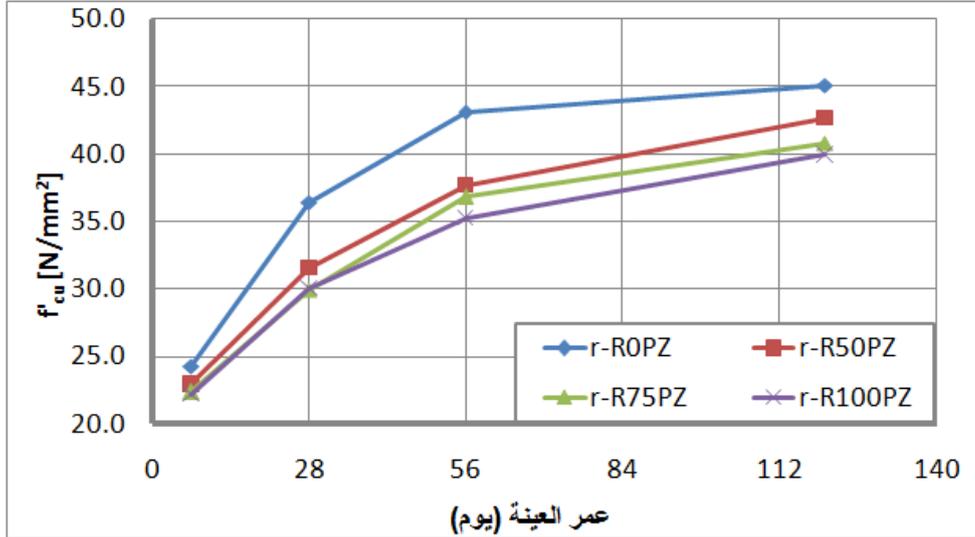
الشكل (8-5) مقاومة الضغط f'_{cu} من أجل كل عمر من الأعمار المدروسة منسوبة إلى مقاومة الضغط للخلطة r-R0PZ عند ذلك العمر

إن تطور مقاومة الضغط مع الزمن من أجل خلطات المجموعة SII موضحة في الشكل (9-5)، حيث يظهر من النتائج أنه على الرغم من اختلاف نسبة الركام المعاد تدويره إلى أن هناك تقارب في تطور المقاومة مع الزمن. حيث يلاحظ هنا أثر وجود البوزولانا والركام المعاد تدويره معاً في زيادة مقدار المقاومة المكتسبة بين اليوم 56 واليوم 120، فمن أجل r-R100PZ تحسنت المقاومة بين هذين العمرين بنسبة 11% في حين أن المقاومة زادت عند r-R0PZ بمقدار 4.5%، تفسر هذه الظاهرة بأن مسامات الركام المعاد تدويره تعمل كخزان مياه يساعد في استمرار تفاعلات الإمهاء من جهة واستمرار عملية تفاعل البوزولانا المستخدمة من جهة أخرى الأمر الذي يؤدي إلى زيادة المقاومة بشكل أكبر عند أعمار متأخرة (مرزا، 2009).

المقارنة بين مقاومات الضغط للمجموعتين SI و SII في اليوم 28 واليوم 120 موضحة في الشكلين (10-5) و(11-5) على الترتيب من أجل النسب الأربعة للركام المعاد تدويره المعتمدة في البحث.

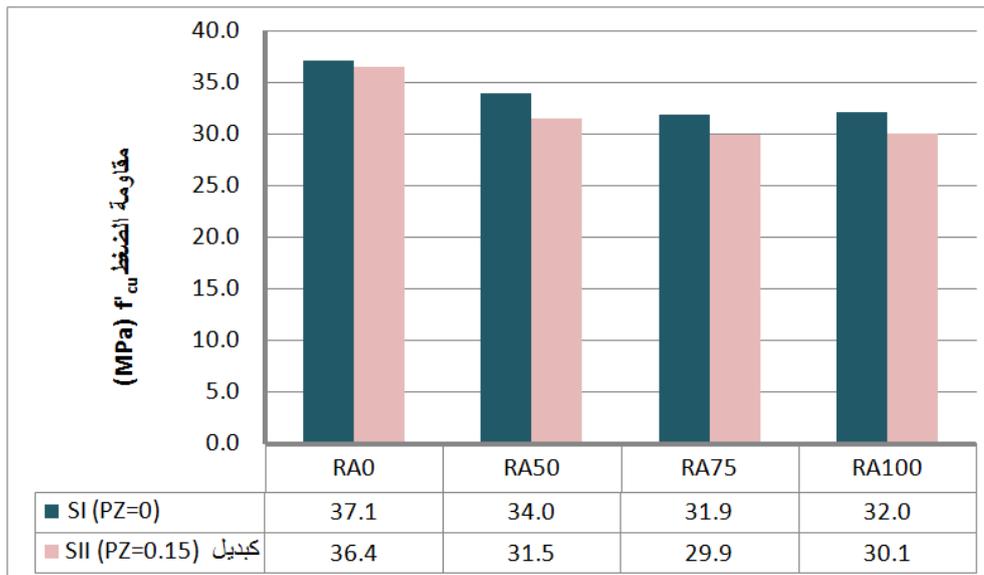
يظهر من الشكل (10-5) أنه في حال استخدام الركام الطبيعي فقط في SII فإن المقاومة التي تم الحصول عليها في اليوم 28 حققت 98% من مقاومة التي تم الحصول عليها في المجموعة SI وهذا يوافق نتائج دراسات سابقة (الرفاعي، 2004). أما عندما يكون محتوى الركام المعاد تدويره 50%، 75%، 100% فإن مقاومات المجموعة SII

قد وصلت إلى 93% تقريبا من المقومات التي تم الحصول عليها في SI. يرجع ذلك إلى تأثير استخدام البوزولانا كبديل وبالتالي تأخر تمام تفاعلات التي تعطي الصلابة للخلطة الخرسانية.

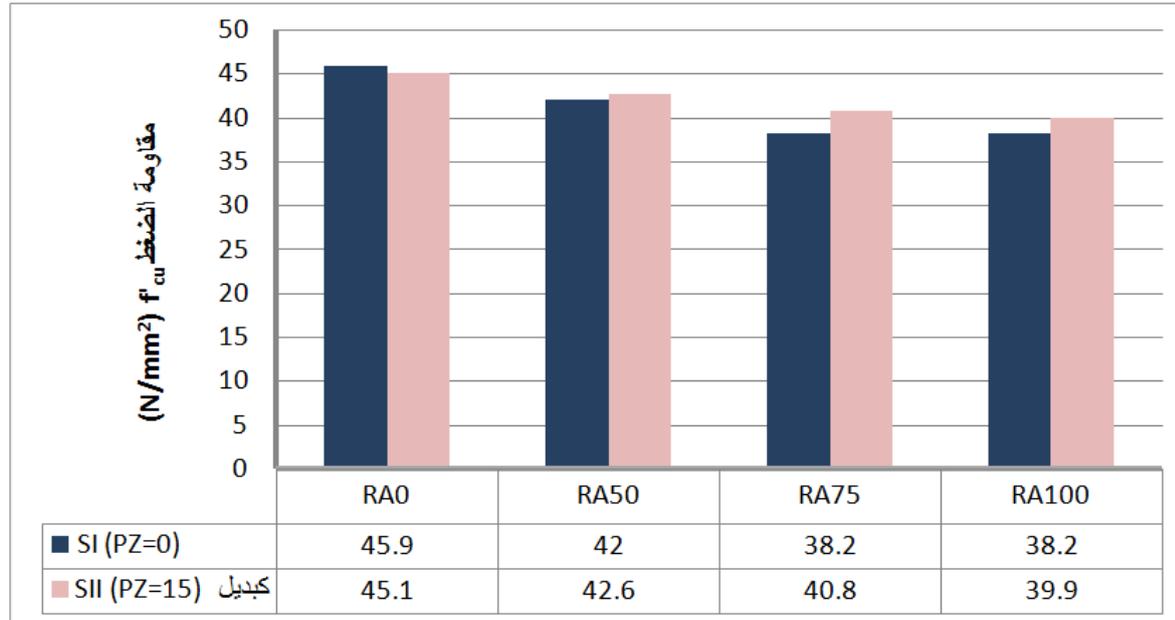


الشكل (9-5) تطور مقاومة الضغط مع الزمن من أجل خلطات المجموعة SII

أصبحت مقومات الضغط للمجموعة SII في اليوم 120 أعلى من مقومات الضغط للمجموعة SI عندما تحوي الخلطة ركام معاد تدويره (الشكل 5-11)، فمن أجل r-R100PZ في SII أصبحت مقاومة الضغط أعلى بـ 5% عما تم الحصول عليه من أجل R100 في SI. وبالتالي استخدام الركام المعاد تدويره لم يؤثر على المقومات التي قد يتم الحصول عليها وذلك عند أعمار متأخرة سواء استخدم الاسمنت البورتلاندي أو استخدم الاسمنت البورتلاندي البوزولاني مع بوزولانا كبديل عن الاسمنت بنسبة 15%. الأمر الذي قد يكون له فوائد كبيرة سواء من الناحية الاقتصادية أو من ناحية تحسين ديمومة الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره كونه أحد العيوب الهامة فيها (Higuera, 2011).



الشكل (10-5) مقارنة بين مقومات الضغط في المجموعتين SI و SII في اليوم 28



الشكل (11-5) مقارنة بين مقاومات الضغط في المجموعتين SI و SII في اليوم 120

2-3-5 مقاومة الشد بالفلق: Splitting Tensile Strength

يوضح الجدول (7-5) قيم الشد بالفلق للمجموعة SII في اليومين 28 و 120 من أجل النسب الأربعة للركام المعاد تدويره، حيث كل قيمة هي وسطي ثلاث قيم.

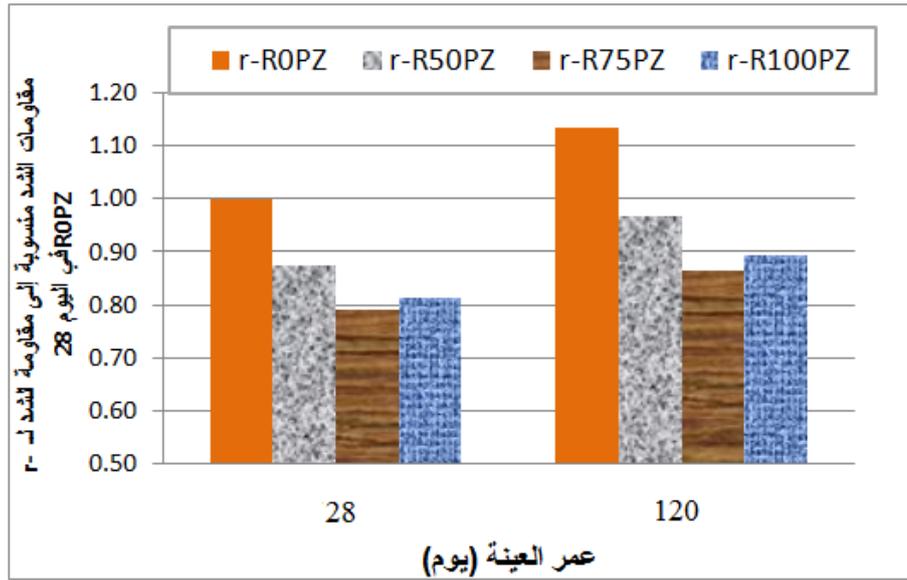
الجدول (7-5) قيم الشد بالفلق للمجموعة SII في اليومين 28 و 120

| مقاومة الفلق (N/mm ²) في اليوم | | نسبة RA % | رمز الخلطة |
|--|------|-----------|------------|
| 120 | 28 | | |
| 2.87 | 2.53 | 0 | r-R0PZ |
| 2.45 | 2.21 | 50 | r-R50PZ |
| 2.19 | 2.00 | 75 | r-R75PZ |
| 2.26 | 2.06 | 100 | r-R100PZ |

يظهر من القيم بأن ما تم لحظه في SI يمكن أن يلحظ في SII، فمقاومة الشد بالفلق تتخفف كلما زادت نسبة الركام المعاد تدويره وذلك في كلا العمرين المدروسين نتيجة للجودة المنخفضة لهذا الركام.

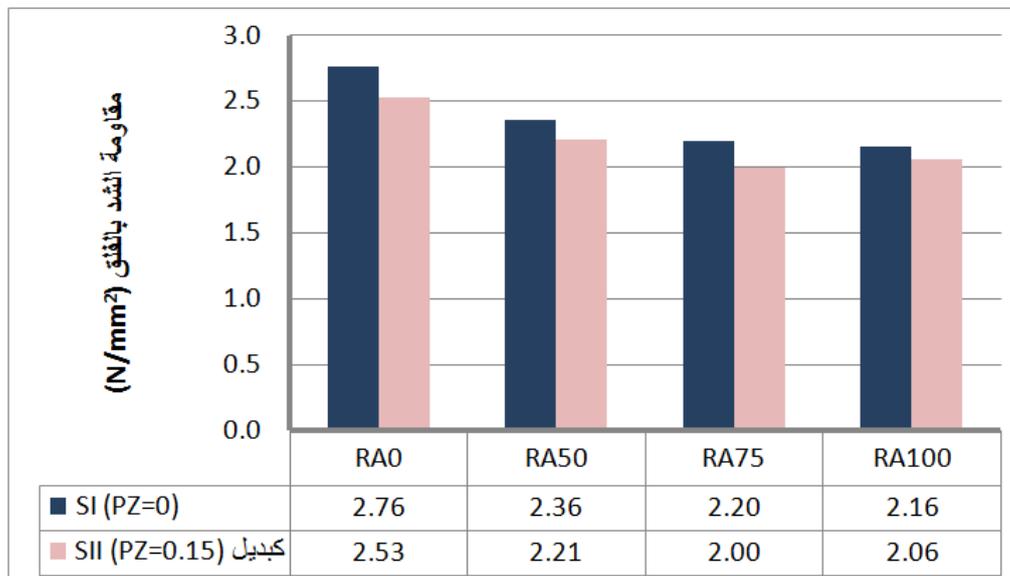
تم في الشكل (12-5) وضع مقاومات الشد بالفلق منسوبة إلى مقاومة الشد بالفلق من أجل r-R0PZ في اليوم 28. يتضح من هذا الشكل أن مقاومة الشد بالفلق لـ r-R50PZ و r-R75PZ و r-R100PZ في اليوم 28 انخفضت 13%، 21%، 19% على الترتيب بالمقارنة مع r-R0PZ. أيضا يلاحظ من الشكل أن مقاومات الشد بالفلق تحسنت في

اليوم 120 من أجل جميع نسب الـ RA المستخدمة بنسبة تتراوح بين 10 و 13% نتيجة استمرار تفاعلات الإماهة والبوزولانا.

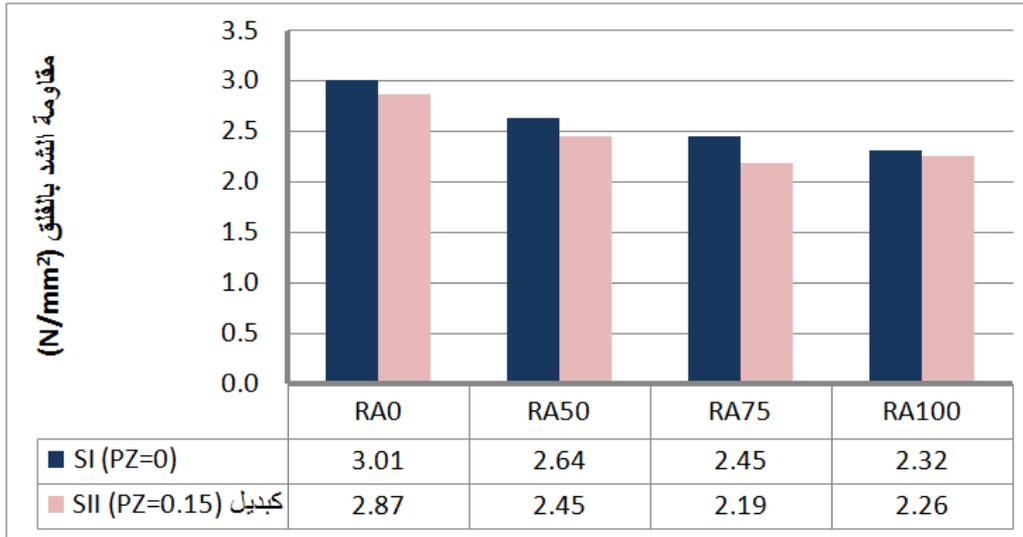


الشكل (12-5) مقاومات الشد بالفلق لخلطات SII منسوبة إلى مقاومة الشد بالفلق من أجل r-R0PZ في اليوم 28

يوضح الشكلان (13-5) و(14-5) مقارنة بين مقاومات الشد بالفلق في المجموعتين SI و SII في اليوم 28 واليوم 120 على الترتيب من أجل النسب الأربعة للركام المعاد تدويره المعتمدة في البحث. يظهر من الشكلين أن استخدام البوزولانا كبديل عن الاسمنت في SII قد خفّض مقاومة الشد بالفلق بالمقارنة مع SI من أجل جميع نسب الركام المعاد تدويره المستخدمة وذلك من أجل العمرين المدروسين. حيث تراوحت نسبة الانخفاض عند اليوم 28 بين 5% وحتى 8%، أما في اليوم 120 فقد حصل انخفاض بنسبة 3% حتى 11%، وبالتالي لم يكن تأثير البوزولانا على الشد كما هو على الضغط في الأعمار المتأخرة وخاصة عندما تستخدم كبديل عن الاسمنت وهذا ما تمت الإشارة إليه أيضا عند (Gonzalez & Martinez, 2008) من خلال دراسة أثر السيلكا على مقاومة الشد في أعمار مختلفة.



الشكل (13-5) مقارنة بين مقاومات الشد بالفلق في المجموعتين SI و SII في اليوم 28



الشكل (14-5) مقارنة بين مقاومات الشد بالفلق في المجموعتين SI و SII في اليوم 120

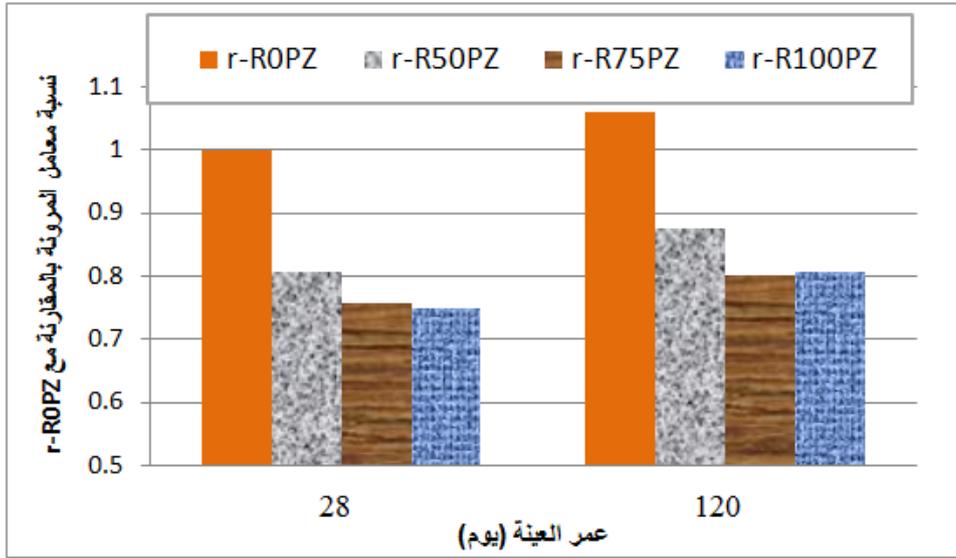
3-3-5 معامل المرونة للمجموعة SII: *Elastic Modulus of SII*

يوضح الجدول (8-5) قيم معامل المرونة للمجموعة SII في اليومين 28 و 120، حيث كل قيمة هي وسطي ثلاث قيم. يتضح من قيم الجدول أنه ينخفض معامل المرونة كلما زادت نسبة RA المستخدم في الخلطة وذلك في كلا العمرين المدروسين بسبب قابلية الركام المعاد تدويره للتشوه أكثر من أجل نفس الحمل بالمقارنة مع الركام الطبيعي.

الجدول (8-5) قيم معامل المرونة للمجموعة SII في اليومين 28 و 120

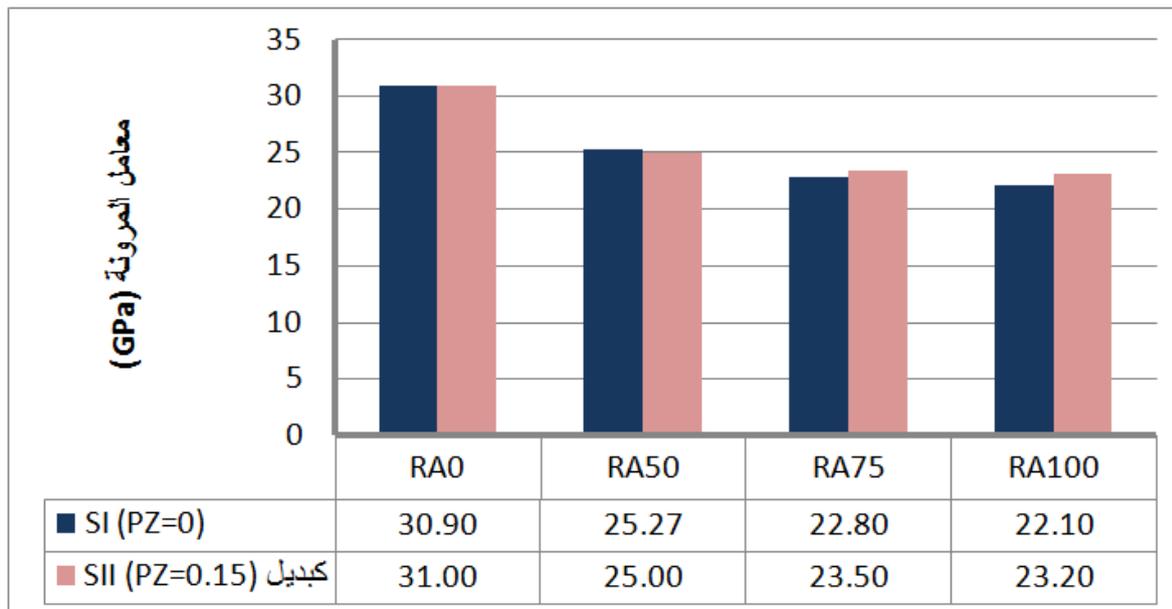
| معامل المرونة (GPa) في اليوم | | نسبة %RA | رمز الخلطة |
|------------------------------|------|-------------|------------|
| 120 | 28 | | |
| 32.9 | 31.0 | 0 | r-R0PZ |
| 27.1 | 25.0 | 50 | r-R50PZ |
| 24.8 | 23.5 | 75 | r-R75PZ |
| 25.0 | 23.2 | 100 | r-R100PZ |

تم في الشكل (15-5) إدراج قيم معامل المرونة لخلطات المجموعة SII منسوبة إلى معامل المرونة لـ r-R0PZ في اليوم 28. حيث يلاحظ أن معامل المرونة يتأثر بشكل واضح عند استخدام الركام المعاد تدويره، ففي اليوم 28 انخفض معامل المرونة بمقدار 25% في r-R100PZ، 26% من أجل r-R75PZ، وبمقدار 19% عند r-R50PZ. وبما أن مقاومة الضغط تحسنت مع الزمن فإن معامل المرونة تحسّن أيضاً عند اليوم 120 بمقدار 6-8% عن القيم التي حققها في اليوم 28.

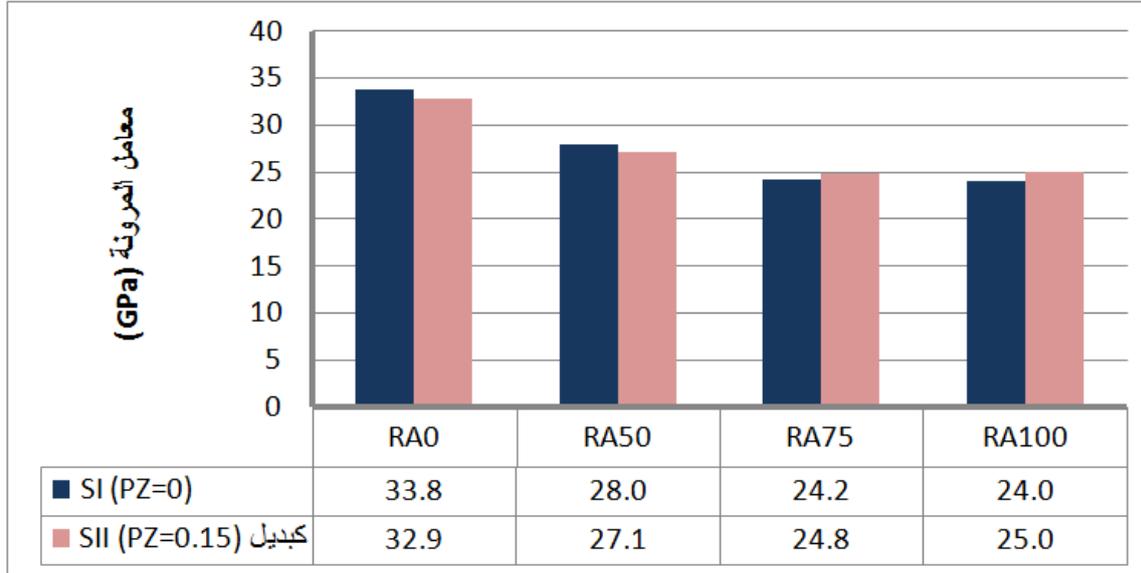


الشكل (15-5) قيم معامل المرونة لخلطات المجموعة SII منسوبة إلى معامل المرونة لـ r-R0PZ في اليوم 28.

يوضح الشكلان (16-5) و(17-5) مقارنة بين معامل المرونة في المجموعتين SI و SII في اليوم 28 واليوم 120 على الترتيب من أجل النسب الأربعة للركام المعاد تدويره المعتمدة في البحث، حيث يظهر أن وجود البوزولانا كبديل عن الاسمنت لم يؤثر على قيم معامل المرونة عند نفس نسبة الاستبدال حيث جميع القيم في SI قريبة جدا من نظيراتها في SI سواء في اليوم 28 أو في اليوم 120، وهذا ما توصل له أيضاً (Suyama et al, 2012) عندما درس أثر الرماد البركاني على الضغط وعلى معامل المرونة، حيث بينت هذه الدراسة أن المواد البوزولانية حسنت مقاومة الضغط ولكن لم يكن لها تأثير ملحوظ على معامل المرونة وإنما المؤثر الأكبر كان نسبة الركام المعاد تدويره.



الشكل (16-5) مقارنة بين معامل المرونة في المجموعتين SI و SII في اليوم 28



الشكل (17-5) مقارنة بين معامل المرونة في المجموعتين SI و SII في اليوم 120

4.5 خصائص الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره مع بوزولانا كإضافة عن الاسمنت المجموعة SIII: *The Properties of RAC with Pozzolana as Additionsto the Cement (Series SII)*

يساعد استخدام الإضافات البوزولانية على تحسين الخرسانة المنتجة من الركام المعاد تدويره من ناحية التحميل طويل الأمد ومعالجة النفاذية والمسامية العالية وبالتالي تتحسن ديمومة الخرسانة ومقاومتها للظروف البيئية المحيطة. لذلك فإن عدّة دراسات قد بحثت في أثر إضافة المواد البوزولانية كالرماد المتطاير وغيار السيليكا على هذا النوع من الخرسانة وقد تم استعراض بعضها في الدراسة المرجعية ضمن الفصل الثالث في الفقرة 3-8-5.

تتوفر مادة البوزولانا الطبيعية مادة بكثرة في عدد من مناطق سوريا وهي رخيصة الثمن، وقد أثبتت التحاليل الكيميائية أنها تحوي على النسبة المطلوبة من أكسيد السيليوم الفعّال الذي يجعلها تعمل كمادة رابطة إضافية تمنح ميزات كثيرة. لذلك تم إضافة هذه المادة في المجموعة SIII وتم تقييم أثرها على أداء الخرسانة من ركام معاد تدويره فيما يخص المواصفات الميكانيكية، لمعرفة إن كان بالإمكان تحسين أداء RAC وجعلها مشابهة للخرسانة التقليدية.

1-4-5 مقاومة الضغط: *Compressive Strength*

في الجدول (9-5) قيم مقاومات الضغط عند الأعمار المدروسة من أجل النسب الأربعة من RA للمجموعة SIII، حيث كل قيمة هي وسطي ثلاث قيم. يظهر من هذا الجدول أنه حتى عند تكون البوزولانا كإضافة على الخلطة في المجموعة SIII فإن الجودة المنخفضة للركام المعاد تدويره تجعل مقاومة الضغط تنخفض كلما زادت نسبة هذا الركام المستخدمة وذلك من أجل جميع الأعمار المدروسة.

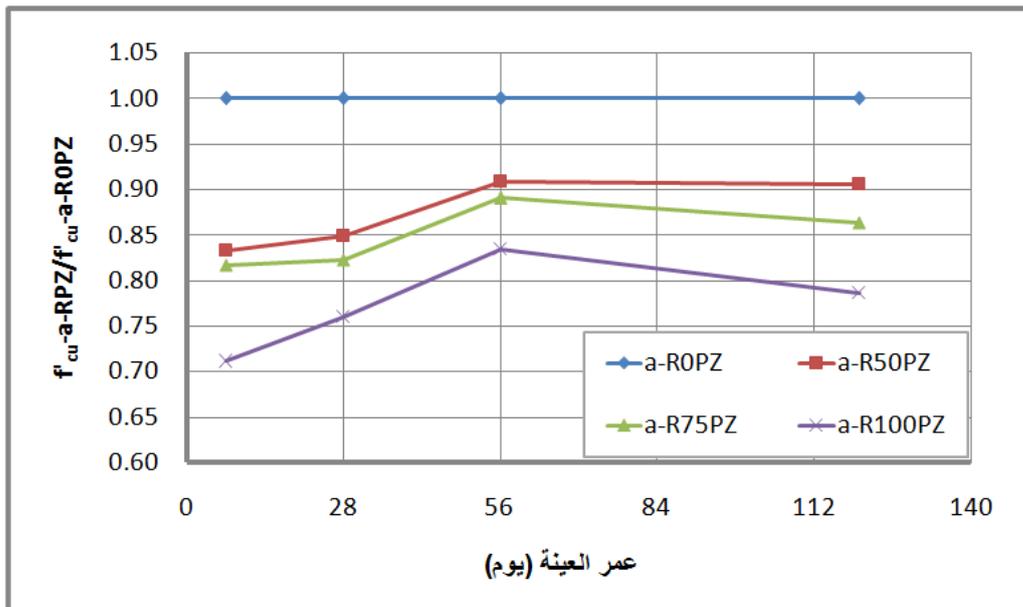
تم في الشكل (18-5) وضع مقاومات الضغط f_{cu} من أجل كل عمر من الأعمار المدروسة منسوبة إلى مقاومة الضغط للخلطة a-R0PZ عند ذلك العمر. يلاحظ من الشكل بأنه في الأعمار 28، 56، 120 يوم، فإن a-R50PZ حققت مقاومات للضغط بفارق 15%، 9%، 9% عن مقاومة الضغط لـ a-R0PZ على التوالي، في حين أن الفارق من

أجل a-R75PZ كان 18%، 11%، 14% على التوالي. أما الفارق من أجل a-R100PZ فكان 24%، 17%، 21% على الترتيب.

الجدول (5-9) قيم مقاومات الضغط عند الأعمار المدروسة من أجل النسب الأربعة من RA للمجموعة SIII

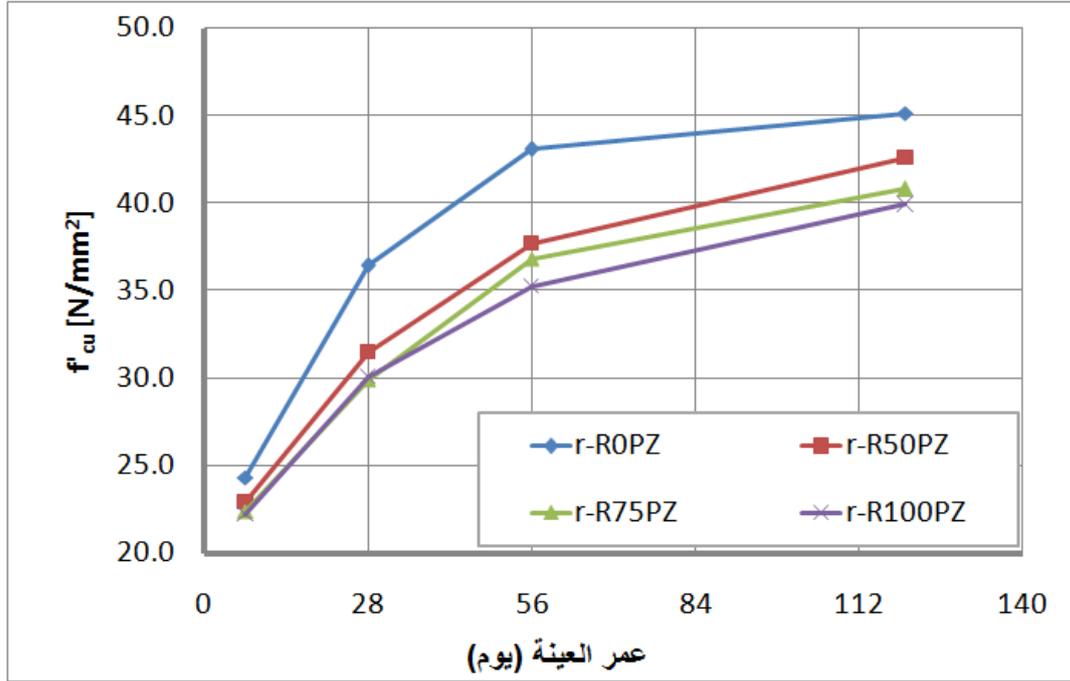
| مقاومة الضغط للمجموعة الأولى (N/mm ²) | | | | نسبة %RA | رمز الخلطة |
|---|------|------|------|-------------|-----------------|
| اليوم | | | | | |
| 120 | 56 | 28 | 7 | | |
| 53.4 | 45.0 | 42.4 | 30.4 | 0 | a-R0PZ |
| 48.4 | 42.7 | 36.0 | 25.3 | 50 | a-R50PZ |
| 46.1 | 41.8 | 34.9 | 24.8 | 75 | a-R75PZ |
| 42.0 | 39.2 | 32.2 | 21.6 | 100 | a-R100PZ |

يتضح مما سبق أن استخدام البوزولانا كإضافة حسن من مقاومات الضغط لخرسانة مع ركام معاد تدويره بعد اليوم 28، حيث بعد هذا العمر بدأ الفارق يتقلص بين هذا النوع من الخرسانة وبين خرسانة بركام طبيعي حتى اليوم 56 حيث نلاحظ أن الفارق عاد وازداد بالمقارنة مع a-R0PZ. قد يفسر هذا الازدياد بالفارق أن المقاومات في RAC بعد اليوم 56 قد تجاوزت 40 N/mm² الأمر الذي قد يجعل المنطقة الانتقالية القديمة في RAC أضعف من المنطقة الانتقالية الجديدة مما يضعف من مقاومات التي يتم الحصول عليها وخاصة مع محتوى عالي من الركام المعاد تدويره (Tam et al, 2004).



الشكل (5-18) مقاومات الضغط f_{cu} من أجل كل عمر من الأعمار المدروسة منسوبة إلى مقاومة الضغط للخلطة a-R0PZ عند ذلك العمر.

إن ما ذكر أعلاه يوضحه أيضاً الشكل (5-19) الذي يُظهر تطور مقاومة الضغط مع الزمن من أجل خلطات المجموعة SIII، حيث من خلال شدة ميلان المنحنيات فإن الكسب بمقاومة الضغط بين اليوم 28 واليوم 56 أعلى عند وجود الركام المعاد تدويره وتراوح بين 16% - 18%، في حين أنه كان 10% في a-R0PZ المنتجة من ركام طبيعي فقط. ومن ثم يقل الكسب في المقاومة بعد اليوم 56 من أجل a-R75PZ و a-R100PZ حيث أصبح 10% و 8% على التوالي. يلاحظ أيضاً من الشكل (5-19) أنه على الرغم من اختلاف نسبة الركام المعاد تدويره ووجود البوزولانا كإضافة إلى أن هناك تقارب في شكل تطور المقاومة مع الزمن.

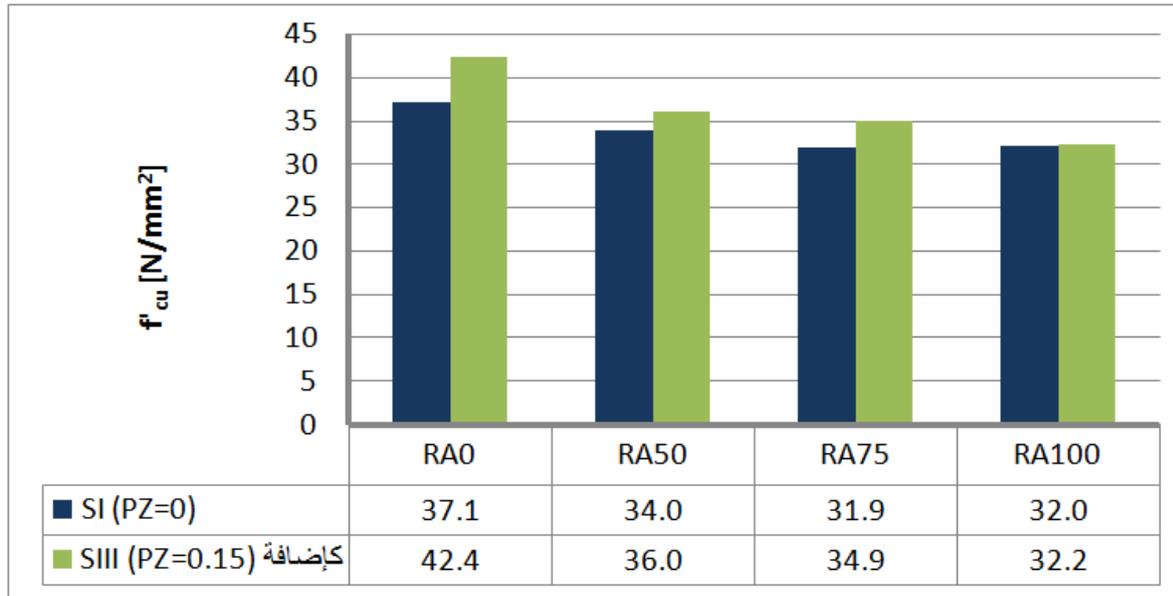


الشكل (5-19) تطور مقاومة الضغط مع الزمن من أجل خلطات المجموعة SIII.

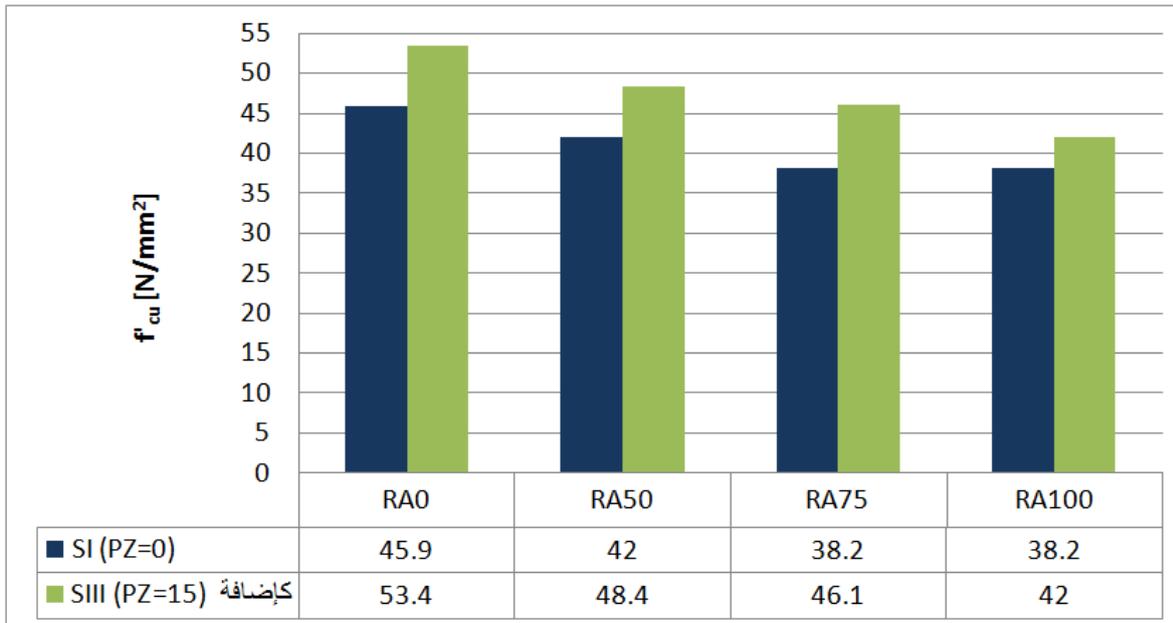
يوضح الشكلان (5-20) و(5-21) مقارنة بين مقاومات الضغط في المجموعتين SI و SIII في اليوم 28 واليوم 120 على الترتيب من أجل النسب الأربعة للركام المعاد تدويره المعتمدة في البحث. يظهر من الشكل (5-20) أن مقاومات الضغط للمجموعة SIII أعلى من مقاومات الضغط للمجموعة SI من أجل جميع النسب المدروسة ما عدا a-R100PZ حيث بقي لنسبة الاستبدال العالية الدور الأكبر في تحديد المقاومة. تم في SIII استخدام مواد رابطة أعلى مما هي عليه في SI، حيث تم المحافظة على نفس عيار الاسمنت 350 Kg/m^3 وإضافة البوزولانا بنسبة 15% من وزن الاسمنت وهذا ما يفسر ارتفاع المقاومات من أجل نفس نسبة الاستبدال. حققت الخلطة R0 في SI مقاومة 37.1 N/mm^2 ، والخلطة a-R50PZ حققت مقاومة 36 N/mm^2 أي إن استخدام 50% من الركام المعاد تدويره مع إضافة البوزولانا بنسبة 15% من وزن الاسمنت أمكن الحصول على حوالي 97% من مقاومة الخرسانة مع ركام طبيعي فقط.

يظهر من الشكل (5-21) أنه في اليوم 120 يصبح تأثير زيادة كمية المواد الرابطة من خلال استخدام البوزولانا كإضافة أوضح حيث مقاومات الضغط للمجموعة SIII أعلى من مقاومات الضغط للمجموعة SI بـ 14%، 13%، 5% من أجل RA100، RA75، RA50، RA0 على الترتيب.

ما يمكن أن نلاحظ من الشكل (5-21) أيضاً أنه عند استخدام 100% من الركام المعاد تدويره أن إضافة البوزولانا مجدداً من أجل مقاومة الضغط عند اعتماد خليط من RA و NA بنسبة 50% لكل منهما، حيث من أجل a- R50PZ فإن هذه الإضافة رفعت مقاومة الضغط إلى 48.4 N/mm² لتصبح أعلى من مقاومة الضغط لـ R0 والتي أعطت في اليوم 120 مقاومة للضغط مقدارها 46 N/mm² أي أمكن الحصول على مقاومة 104% من مقاومة R0. وبالتالي إضافة البوزولانا بنسبة 15% من وزن الاسمنت جعل بالإمكان الحصول على خرسانة منتجة من 50% من الركام المعاد تدويره أداؤها على الضغط شبيه بالخرسانة المنتجة من ركام طبيعي. وهذه نتيجة هامة يجب أخذها بعين الاعتبار في حال أردنا اعتماد الركام المعاد تدويره في إنتاج الخرسانة الإنشائية.



الشكل (5-20) مقارنة بين مقاومات الضغط في المجموعتين SI و SIII في اليوم 28



الشكل (5-21) مقارنة بين مقاومات الضغط في المجموعتين SI و SIII في اليوم 120

2-4-5 مقاومة الشد بالفلق: Splitting tensile strength

يوضح الجدول (10-5) قيم الشد بالفلق للمجموعة SIII في اليومين 28 و120 من أجل النسب الأربعة للركام المعاد تدويره، حيث كل قيمة هي وسطي ثلاث قيم. تبيّن قيم هذا الجدول أن مقاومة الشد بالفلق تنخفض كلما زادت نسبة الركام المعاد تدويره وذلك في كلا العمرين المدروسين بسبب الجودة المنخفضة للركام.

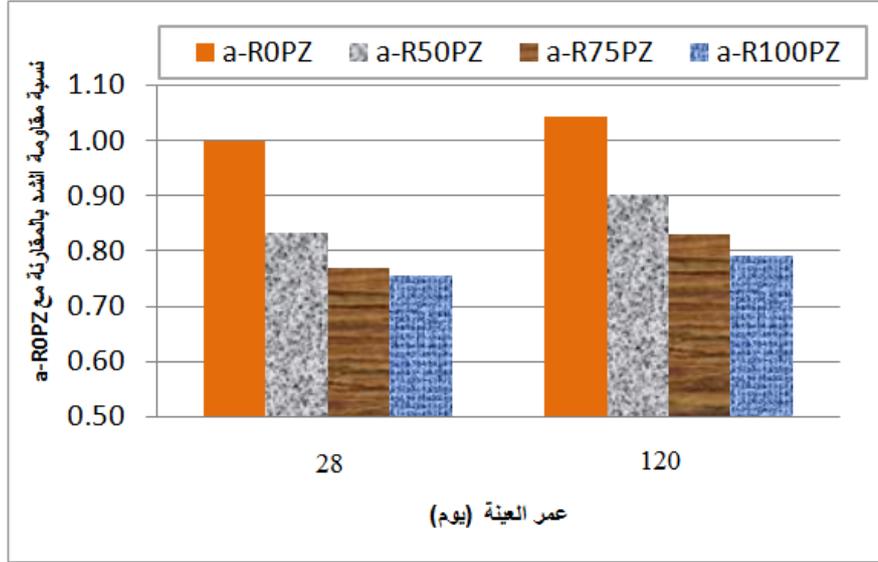
الجدول (10-5) قيم الشد بالفلق للمجموعة SIII في اليومين 28 و120

| مقاومة الفلق (N/mm ²) في اليوم | | نسبة RA% | رمز الخلطة |
|--|------|----------|------------|
| 120 | 28 | | |
| 3.17 | 3.04 | 0 | a-R0PZ |
| 2.74 | 2.53 | 50 | a-R50PZ |
| 2.52 | 2.34 | 75 | a-R75PZ |
| 2.41 | 2.30 | 100 | a-R100PZ |

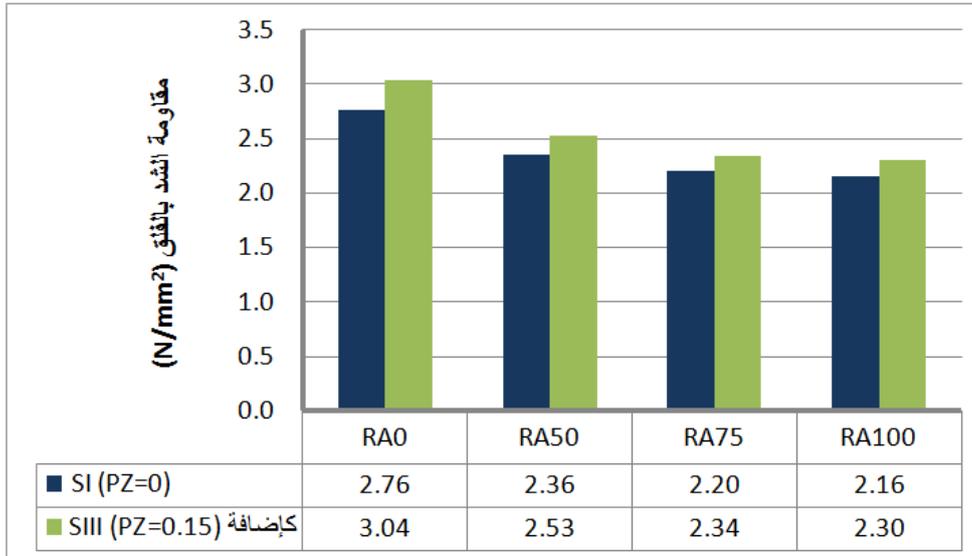
تم في الشكل (22-5) وضع مقاومات الشد بالفلق منسوبة إلى مقاومة الشد بالفلق من أجل a-R0PZ في اليوم 28. يتضح من هذا الشكل أن مقاومة الشد بالفلق لـ a-R0PZ كانت أعلى بشكل واضح من مقاومات الشد بالفلق لباقي خلطات المجموعة، حيث كان الفارق بينها وبين a-R50PZ، a-R75PZ و a-R100PZ هو 18%، 23%، 24% على الترتيب. قد يعود عدم ظهور فاعلية إضافة البوزولانا على الشد في اليوم 28 كما هو على الضغط عند استخدام الركام المعاد تدويره إلى عدم غسله وبالتالي الغبار الملصق بسطحه نتيجة عملية تكسير الخرسانة لعب دورا سلبيا على مقاومات الشد على الرغم من استخدام الإضافات البوزولانية.

يظهر من الشكل (22-5) أن مقاومات الشد على الفلق في هذه المجموعة تحسنت عند اليوم 120 بنسب تراوحت من 5% حتى 8% حيث معظم الخصائص الميكانيكية مرتبطة بمقاومة الضغط وأي تحسّن فيها ينتج عنه تحسّن في باقي الخصائص.

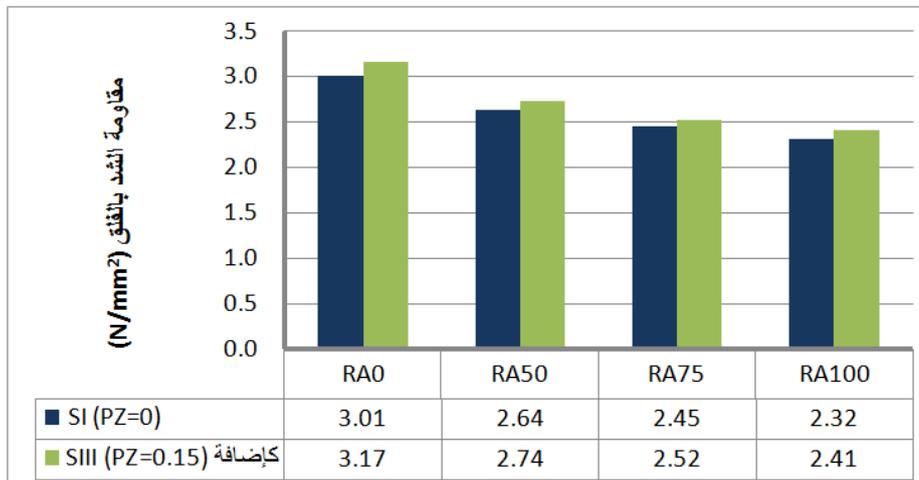
يوضح الشكلان (23-5) و(24-5) مقارنة بين مقاومات الشد بالفلق في المجموعتين SI و SIII في اليوم 28 واليوم 120 على الترتيب من أجل النسب الأربعة للركام المعاد تدويره المعتمدة في البحث. حيث يلاحظ من الشكلين أن عند العمرين المدروسين فإن مقاومة الشد بالفلق لـ SIII أعلى من مقاومة الشد بالفلق لـ SI وذلك عند النسب الأربعة للركام المعاد تدويره. وكانت نسبة الارتفاع متقاربة بحدود 6% من أجل محتوى ركام معاد تدويره 50% فما فوق. نلاحظ من الشكلين أن استخدام البوزولانا كإضافة لم يحسّن مقاومة الشد للخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره لتصبح شبيهة بتلك المنتجة من ركام طبيعي. ولكن أفضل النتائج كانت من أجل a-R50PZ حيث تم الحصول على مقاومة شد بالفلق حوالي 92% من R0 وذلك في العمرين 28 و120 يوم.



الشكل (5-22) مقاومات الشد بالفلق منسوبة إلى مقاومة الشد بالفلق من أجل a-R0PZ في اليوم 28



الشكل (5-23) مقارنة بين مقاومات الشد بالفلق في المجموعتين SI و SI III في اليوم 28



الشكل (5-24) مقارنة بين مقاومات الشد بالفلق في المجموعتين SI و SI III في اليوم 120

3-4-5 معامل المرونة للمجموعة SIII: Elastic Modulus of SIII

يوضح الجدول (11-5) قيم معامل المرونة للمجموعة SIII في اليومين 28 و120، حيث كل قيمة هي وسطي ثلاث قيم. يظهر من قيم الجدول أن معامل المرونة ينخفض كلما زادت نسبة RA المستخدم في الخلطة وذلك في كلا العمرين المدروسين. وكما في المجموعتين SI وSII فإن معامل المرونة كان الأكثر تأثراً بوجود الركام المعاد تدويره.

الجدول (11-5) قيم معامل المرونة للمجموعة SIII في اليومين 28 و120،

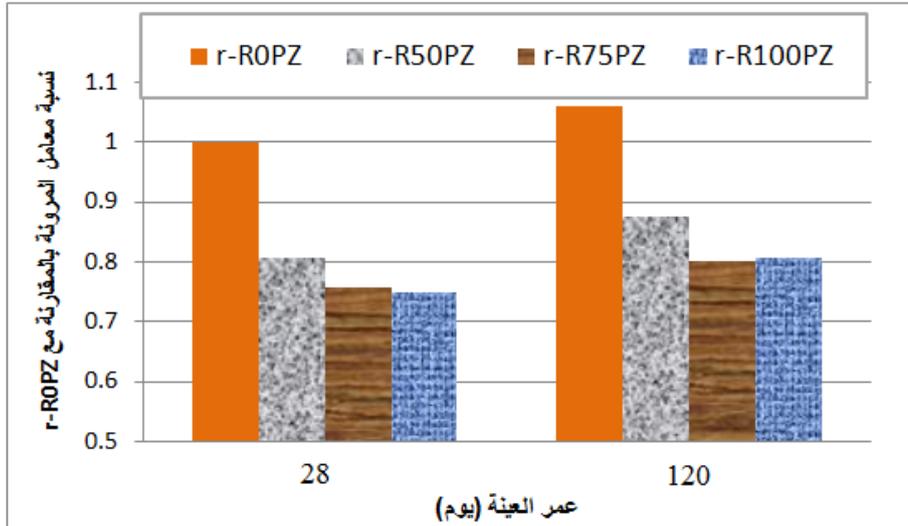
| معامل المرونة (GPa) في اليوم | | رمز الخلطة | نسبة %RA |
|------------------------------|------|------------|----------|
| 120 | 28 | | |
| 35.8 | 33.0 | a-R0PZ | 0 |
| 30.1 | 26.4 | a-R50PZ | 50 |
| 26.1 | 23.3 | a-R75PZ | 75 |
| 25.3 | 22.5 | a-R100PZ | 100 |

يوضح الشكل (5-25) نسبة معامل المرونة لخلطات المجموعة SIII بالمقارنة مع معامل المرونة لـ a-R0PZ في اليوم 28، يظهر من الشكل أن معامل المرونة انخفض بمقدار 20%، 29%، 32% من أجل a-R50PZ، a-R75PZ، a-R100PZ على الترتيب، ويلاحظ بأن الفارق في معامل المرونة من أجل RAC بالمقارنة مع NAC كان الأعلى في هذه المجموعة وذلك لأن إضافة البوزولانا كان لها أثر إيجابي على قيمة معامل المرونة عند استخدام الركام الطبيعي أكثر من حالة استخدام الركام المعاد تدويره.

مع التقدم بالعمر عند 120 يوم، تحسّن معامل المرونة من أجل جميع الخلطات عن اليوم 28، وكانت نسبة التحسّن الأكبر في a-R50PZ وهي 14%، أما مع a-R0PZ فكان التحسّن 8%. في حين أنها من أجل a-R75PZ و a-R100PZ كانت 12% وهذا ينسجم مع ما تم لحظه في مقاومة الضغط حيث كان التحسّن الأكبر مع الزمن في a-R50PZ وهو 34%، أما في a-R75PZ و a-R100PZ 32% و 30% على الترتيب وأخيراً في a-R0PZ كان التحسن هو الأدنى 25% وذلك بالمقارنة مع مقاومات الضغط للخلطة عند اليوم 28

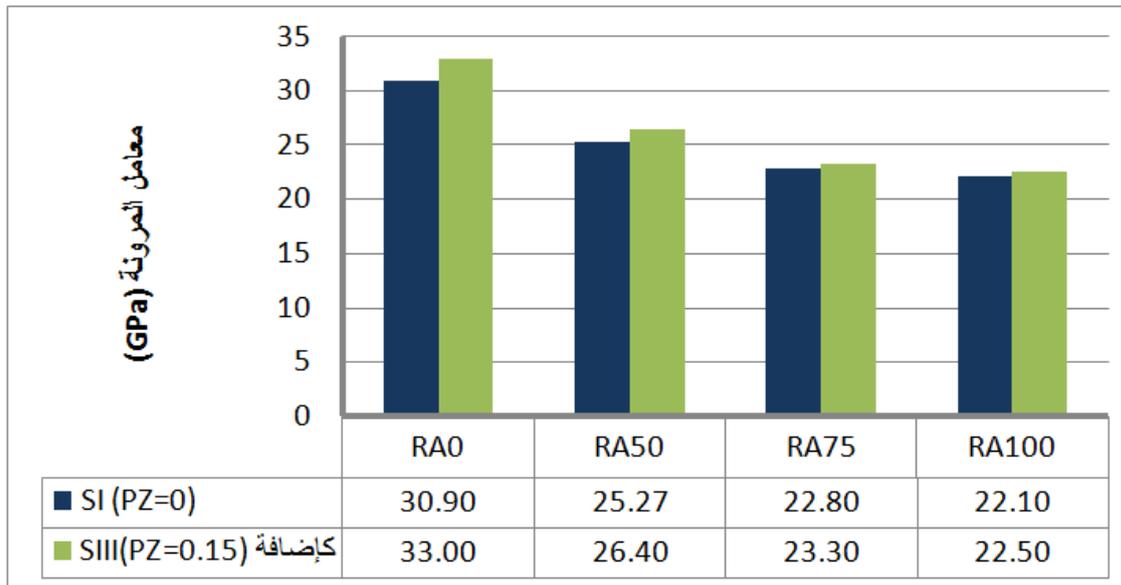
يوضح الشكلان (5-26) و(5-27) مقارنة بين معامل المرونة في المجموعتين SI وSIII في اليوم 28 واليوم 120 على الترتيب من أجل النسب الأربعة للركام المعاد تدويره المعتمدة في البحث.

يظهر من الشكل (5-26) أنه في اليوم 28 ومن أجل النسب الأربعة فإن معامل المرونة للمجموعة SIII أعلى من معامل المرونة لـ SI ولكن بنسب قليلة تراوحت بين 6% في RA0 وصولاً إلى 2% في RA100. أما في اليوم 120 كما يوضح الشكل (5-27) فبقيت نسبة التحسن 6% في RA0 وارتفعت إلى 8% في RA50 و RA75. أما من أجل RA100 فإن إضافة البوزولانا في SIII جعل معامل المرونة في اليوم 120 أعلى بـ 5% مما هو عليه في SI.



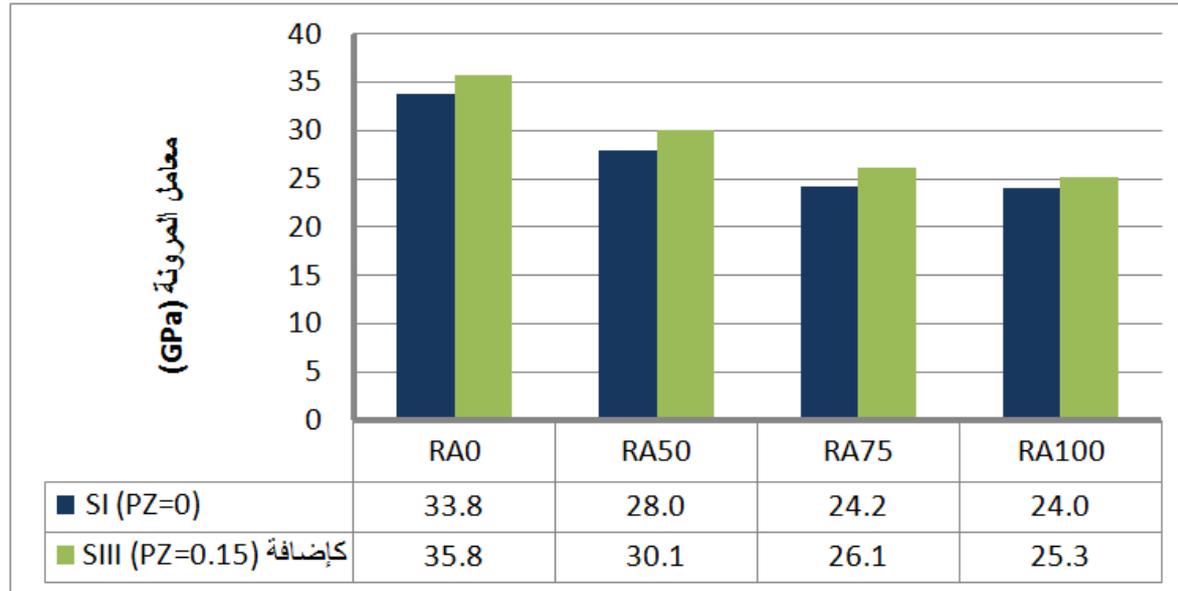
الشكل (5-25) نسبة معامل المرونة لخلطات المجموعة SIII بالمقارنة مع معامل المرونة لـ r-R0PZ في اليوم 28

حسّنت إضافة البوزولانا مقاومة الضغط وبالتالي من المتوقع أن يحدث تحسّن بمعامل المرونة للارتباط الكبير بين هاتين الخاصتين، وقد ظهر هذا الأمر بشكل أوضح في عمر متأخر حيث تكون البوزولانا أتّمت التفاعلات التي تساهم في تحسين الخصائص. ولكن درجة التحسن في معامل المرونة كانت أقل مما هي عليه في مقاومة الضغط وهذا يتوافق مع ما تمت الإشارة إليه عند (Gonzalez & Martinez, 2008; Suyama et al, 2012).



الشكل (5-26) مقارنة بين معامل المرونة في المجموعتين SI و SIII في اليوم 28

يجدر الذكر أنه على الرغم من إضافة البوزولانا إلى أننا لم نتمكن من الحصول على قيمة لمعامل المرونة قريبة من التي حصلنا عليها لـ R0 سواء في العمر 28 يوم أو 120 يوم. ولكن أفضل القيم كانت عندما اعتمد خليط بنسبة 50% من الركام المعاد تدويره والركام الطبيعي، حيث حقق معامل المرونة لـ r-R50PZ نسبة 85% من R0 في اليوم 28، ونسبة 91% في اليوم 120.



الشكل (5-27) مقارنة بين معامل المرونة في المجموعتين SI و SIII في اليوم 120

مما سبق يمكن أن نستنتج أن استخدام الركام المعاد تدويره أثر سلبياً على جميع الخصائص المدروسة للخرسانة سواء بحالتها الطازجة أو المتصلبة مما يجعل RAC ملائمة أكثر في العناصر الغير إنشائية كبلاطات الأرضيات وفي إنشاء السدود وفي الطرقات.. الخ. أعطى اعتماد خليط بنسبة 50% من الركام المعاد تدويره أفضل النتائج في جميع المجموعات المدروسة وأمكن بإضافة البوزولانا الطبيعية بنسبة 15% من وزن الاسمنت من الحصول على مقاومة ضغط شبيهة بمقاومة الضغط لخرسانة بركام طبيعي أما مقاومة الشد ومعامل المرونة فكانت أخفض بحدود 10%.

5.5 دراسة الانعطاف لجوائز من خرسانة منتجة من ركام معاد تدويره *Study of the Flexure on Beams of RAC*

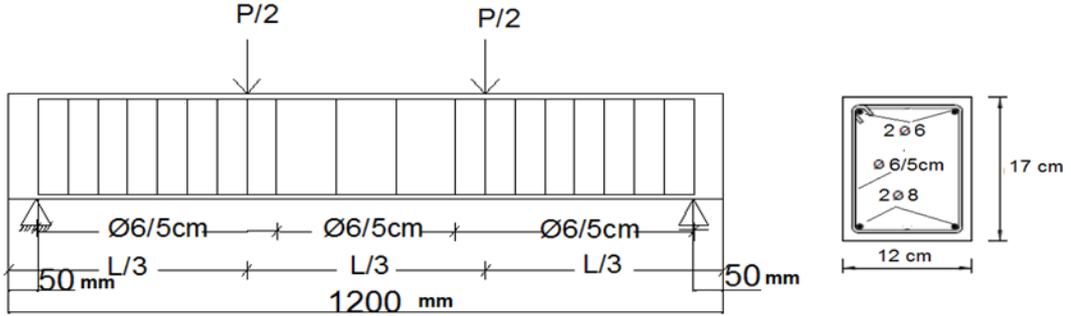
يعتبر دراسة تأثير استخدام الركام المعاد تدويره على سلوك الجوائز المعرضة للانعطاف أمر ضروري كون الجوائز تعتبر واحدة من العناصر الإنشائية الهامة ومن الضروري معرفة إمكانية استخدام الركام المعاد تدويره فيها. وعليه فقد تمت دراسة جوائز بثلاث نسب من الركام المعاد تدويره (0%، 50%، 100%) وتم الاقتصار فقط على المجموعة الأولى SI حيث استعمل الاسمنت البورتلاندي فقط، وفي المجموعة الثانية SII استخدمت البوزولانا كبديل عن الاسمنت بنسبة 15% من وزنه.

تم إجراء تجربة انعطاف صافي وفق (الفصل الرابع في الفقرة 4-5-5) وإيجاد منحنى قوة- انتقال لكل جاز من الجوائز المختبرة. وتم بدايةً عرض المنحنيات الناتجة من أجل كل خلطة على حدا وبعدها تمت المقارنات بين سلوك الجوائز على الانعطاف في المجموعة الواحدة وأيضاً بين المجموعتين لمعرفة مدى تأثير هذه المادة على هذا السلوك.

1-5-5 الجوائز المختبر *Tested Beam*

يوضح الشكل (5-28) مقطع الجوائز وتفصيلات التسليح والاستناد، حيث أبعاد المقطع العرضي 17x12 سم ومجازه 120 سم. تم استخدام قضيبين تسليح سفلي $\phi 8$ وقضيبين تسليح علوي $\phi 6$. تم تكثيف الأساور عند المساند

وحتى ثلث المجاز تقريباً حتى لا يحدث الانهيار على القص فوضع $\phi 6/5\text{cm}$ ، أما في وسط المجاز فتم زيادة التباعد بين الأساور لتصبح $\phi 6/10\text{cm}$.



الشكل (28-5) مقطع الجانز وتفصيلات التسليح والاستناد

2-5-5 المجموعة الأولى (ركام معاد تدويره بدون إضافات): The First Series (RA without Additions)

أجري اختبار الانعطاف على جوائز المجموعة SI لمعرفة أثر نسبة الركام المعاد تدويره على قيم الانتقال في منتصف مجاز الجانز المسلح.

يوضح الجدول (12-5) قيم الانتقال الشاقولي منتصف المجاز لجوائز المجموعة الأولى SI وهم R0، R50، R100 حيث كل قيمة هي وسطي ثلاث قيم تم إيجادها أثناء كسر ثلاثة جوائز من كل خلطة. كما يوضح الشكل (5-29) علاقة قوة - انتقال لنفس الجوائز حيث كل منحنى هو وسطي ثلاثة منحنيات تم إيجادها من كسر ثلاثة جوائز من كل خلطة. المحور الأفقي في الشكل يمثل الانتقال الشاقولي وسط المجاز والمحور الشاقولي يمثل قيمة القوة المطبقة والتي قسمت إلى قوتين متساويتين كما هو موضح في الشكل (5-28).

لم تتأثر علاقة قوة - انتقال بالنسبة المستخدمة من الركام المعاد تدويره، حيث يظهر من الشكل (5-29) أن القوة العظمى التي تحملتها الجوائز كانت متقاربة جدا وكانت 29.65 KN في R100 و 30.7 KN في R50 وأخيرا 31.3 KN في R0، أي أن الفارق لم يتجاوز 5%. لكن يمكن أن يلحظ أن الانتقال الحاصل عند أي قوة يزداد قليلا مع زيادة نسبة الركام المعاد تدويره حيث زاد الانتقال في R50 و R100 بالمقارنة مع الانتقال في R0 عند سيلان التسليح بنسبة 20% و 34% على التوالي. يرجع ذلك إلى أن قيمة معامل المرونة تنخفض كلما زادت نسبة الركام المعاد تدويره في الخلطة لأن بنيته التي تحوي فراغات ومسامات بسبب المونة القديمة الملتنقة على سطحه تسمح له بتشوهات أكبر من أجل نفس الحمل.

يمكن القول بأن الجوائز التي تحوي ركام معاد تدويره وبالمقارنة مع جوائز بركام طبيعي فإنها ستبدي لدونة (Plasticity) أكبر عند سيلان التسليح، وبالتالي ستكون قيمة السهم المتشكل أكبر عند نفس القوة. وهذا أمر يجب أخذه بعين الاعتبار عندما تنفذ عناصر من RAC.

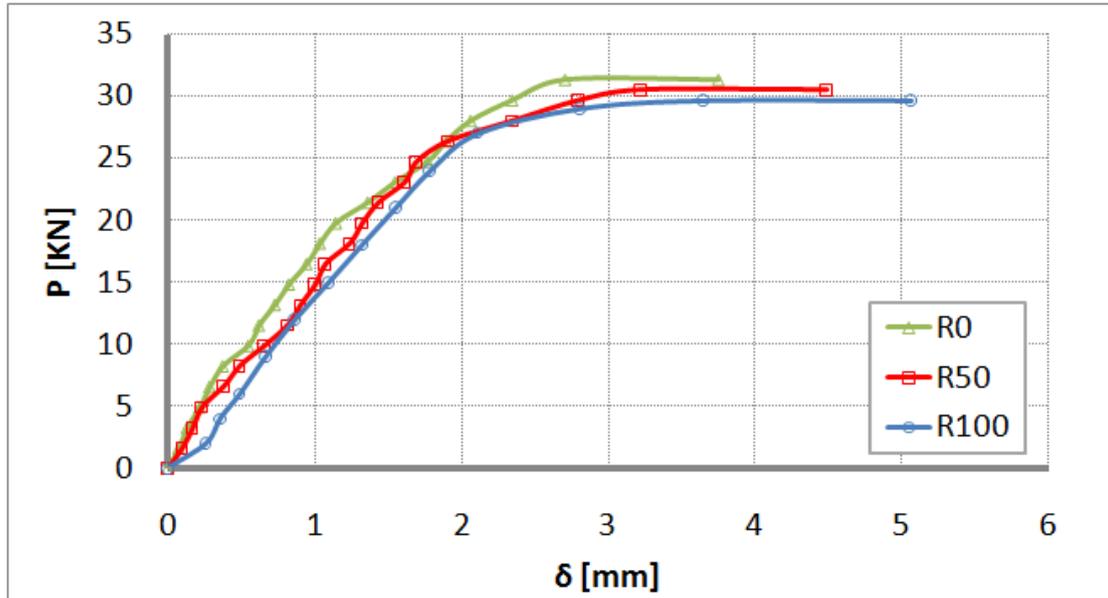
الجدول (5-12) قيم الانتقال الشاقولي منتصف المجاز للجوائز المختبرة في المجموعة SI

| الانتقال الشاقولي وسط مجاز الجائز [mm] | | | الحمل المطبق [KN] |
|--|-------|------|-------------------|
| R100 | R50 | R0 | |
| 0 | 0 | 0.00 | 0 |
| 0.12 | 0.1 | 0.08 | 2 |
| 0.325 | 0.17 | 0.13 | 3 |
| 0.34 | 0.235 | 0.22 | 5 |
| 0.545 | 0.38 | 0.29 | 7 |
| 0.6 | 0.49 | 0.38 | 8 |
| 0.725 | 0.66 | 0.55 | 10 |
| 0.865 | 0.815 | 0.62 | 12 |
| 0.941 | 0.905 | 0.73 | 13 |
| 1.095 | 1.005 | 0.83 | 15 |
| 1.17 | 1.075 | 0.95 | 16 |
| 1.32 | 1.24 | 1.04 | 18 |
| 1.47 | 1.325 | 1.15 | 20 |
| 1.55 | 1.435 | 1.36 | 21 |
| 1.71 | 1.615 | 1.55 | 23 |
| 1.99 | 1.695 | 1.77 | 25 |
| 2.195 | 1.91 | 1.90 | 26 |
| 2.365 | 2.35 | 2.06 | 28 |
| 3.64 | 3.23 | 2.71 | 29 |
| 5.06 | 4.49 | 3.75 | حمولة الانهيار |

تم اختيار نسبة تسليح هنا أقل من النسبة العظمى وهي الحالة التي توافق الحالة التي يصمم عليها معظم الجوائز، أي أنه تمت دراسة جوائز نمط انهيارها على الشد وهذا ما جعل سلوك الجوائز متقارب كون المسيطر على السلوك هو التسليح، من هنا تأتي أهمية العمل التحليلي الذي سيأتي لاحقاً في تغيير نسبة التسليح وبالتالي معرفة أثر المادة الجديدة على القوة العظمى التي يتحملها الجائز.

تم مراقبة بدء ظهور التشققات وشكل انتشارها أثناء إجراء التجارب وتبين أن التشققات في الجوائز من ركام معاد تدويره تمتد وتتسع عند حمل أقل من حالة جائز بركام طبيعي فمن أجل الجائز R0 فقد امتد الشق واتسع تحت نقاط ارتكاز الحمولة عند قوة قدرها 23.06 KN في حين كانت تساوي 22.24 KN في الجائز R50 أما في الجائز R100 فقد بلغت الحمولة 21.4 KN شكل (5-30)، يفسر ذلك بأن الاجهاد الذي تتحمله الخرسانة على الشد في حالة الركام المعاد تدويره أقل من ذلك الذي تتحمله الخرسانة مع ركام طبيعي وبالتالي تظهر التشققات وتمتد في مراحل تحميل مبكرة نسبياً في الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره. إن هذه الظاهرة أشار إليها أيضاً (Ikegawa, 2009).

ولكن على الرغم من اختلاف نسب الركام المعاد تدويره في الجوائز إلا أن شكل التشققات ونمط انتشارها كان متشابه تقريباً من أجل جميع نسب من أجل جميع نسب RA المستخدمة وهذا يوافق ما ذكر في دراسة (Yehia et al, 2014)، حيث ظهر بداية شقين تحت مكان استناد التحميل عندما وصل إجهاد الشد المطبق إلى الإجهاد الذي تتحمله الخرسانة على الشد، ومع ازدياد الحمولة امتد واتسع هذين الشقين تلا ذلك ظهور شقوق أخرى في مناطق قريبة من هذين الشقين، وفي مرحلة ما من التحميل يتوقف ظهور تشققات جديدة ويحدث فقط توسع للشقوق التي ظهرت حتى حصول الانهيار.



الشكل (29-5) علاقة قوة - انتقال لجوائز المجموعة الأولى SI (R100، R50، R0) الدراسة الحالية



الشكل (30-5) شكل التشققات في بعض الجوائز المختبرة.

3-5-5 المجموعة الثانية (ركام معاد تدويره مع بوزولانا كبديل عن الاسمنت):

The Second Series (RA with Pozzolana as replacement of the Cement)

تم إجراء اختبار الانعطاف على جوائز المجموعة الثانية لمعرفة أثر استخدام البوزولانا كبديل عن الاسمنت بنسبة 15% من وزنه على قيم الانتقال، و يوضح الجدول (13-5) قيم الانتقال للجوائز المختبرة وهي r-R50PZ، r-R100PZ حيث كل قيمة هي وسطي ثلاث قيم .

يوضح الشكل (31-5) علاقة قوة - انتقال لجوائز المجموعة الثانية SII وهم r-R50PZ، r-R100PZ حيث كل منحنى هو وسطي ثلاثة منحنيات تم إيجادها من كسر ثلاثة جوائز من كل خلطة. يمثل المحور

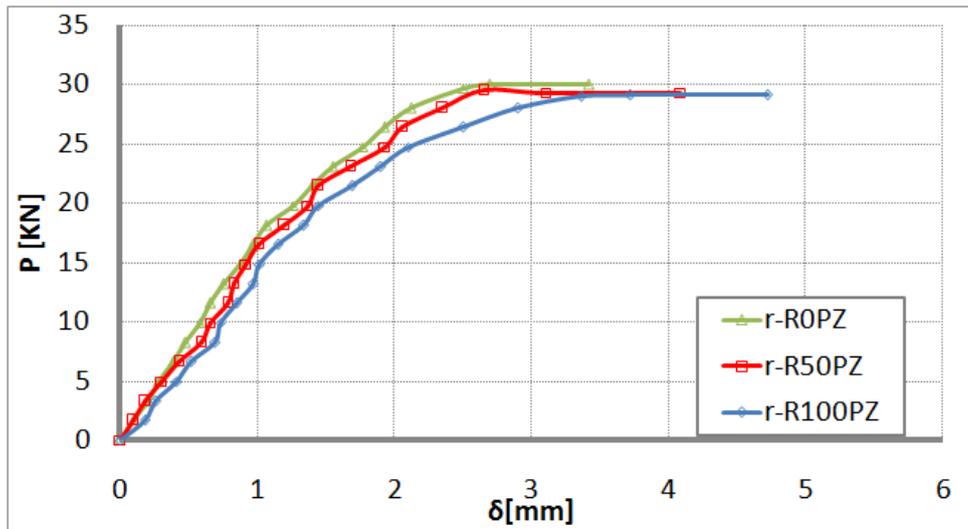
الأفقي في الشكل (5-31) الانتقال الشاقولي وسط المجاز و يمثل المحور الشاقولي قيمة القوة المطبقة والتي قسمت إلى قوتين متساويتين كما تم بيانه سابقاً في الشكل (5-28).

الجدول (5-13) قيم الانتقال للجوائز المختبرة من المجموعة SII .

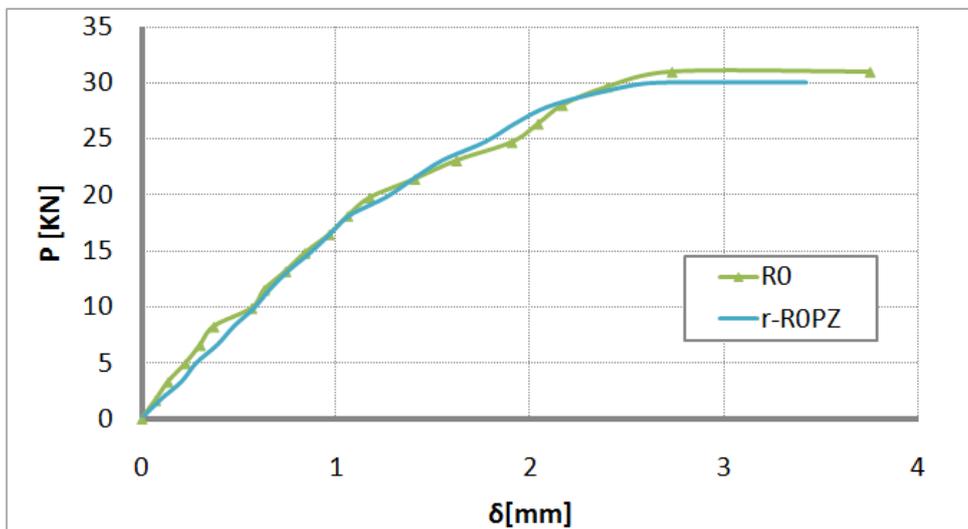
| الانتقال الشاقولي وسط مجاز الجائز [mm] | | | الحمل المطبق [KN] |
|--|----------|--------|-------------------|
| r-R100PZ | r-R50PZ | r-R0PZ | |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.18 | 0.1 | 0.095 | 2 |
| 0.26 | 0.184168 | 0.205 | 3 |
| 0.41 | 0.305387 | 0.28 | 5 |
| 0.52 | 0.429319 | 0.39 | 7 |
| 0.69 | 0.59 | 0.475 | 8 |
| 0.73 | 0.655 | 0.58 | 10 |
| 0.85 | 0.785 | 0.66 | 12 |
| 0.97 | 0.828 | 0.755 | 13 |
| 1.015 | 0.915 | 0.87 | 15 |
| 1.15 | 1.01 | 0.97 | 16 |
| 1.34 | 1.2 | 1.07 | 18 |
| 1.445 | 1.37 | 1.26 | 20 |
| 1.69 | 1.45 | 1.4 | 21 |
| 1.9 | 1.68 | 1.55 | 23 |
| 2.1 | 1.93 | 1.77 | 25 |
| 2.5 | 2.06 | 1.925 | 26 |
| 2.9 | 2.35 | 2.12 | 28 |
| 3.34 | 3.1 | 2.71 | 29 |
| 4.72 | 4.09 | 3.42 | حمولة الانهيار |

لم تتأثر علاقة قوة - انتقال بالنسبة المستخدمة من الركام المعاد تدويره، حيث كما هو واضح من الشكل (5-31) كانت القوة العظمى التي تحملتها الجوائز متقاربة جدا وبلغت حوالي 30 KN عند الانهيار. لكن يمكن أن يلاحظ أن الانتقال الحاصل عند سيلان التسليح ازداد مع زيادة نسبة الركام المعاد تدويره بنسبة 14% في r-R50PZ وبنسبة 23% في r-R100PZ، وسبب ذلك أيضا انخفاض معامل المرونة مع ازدياد نسبة الركام المعاد تدويره من أجل المجموعة SII.

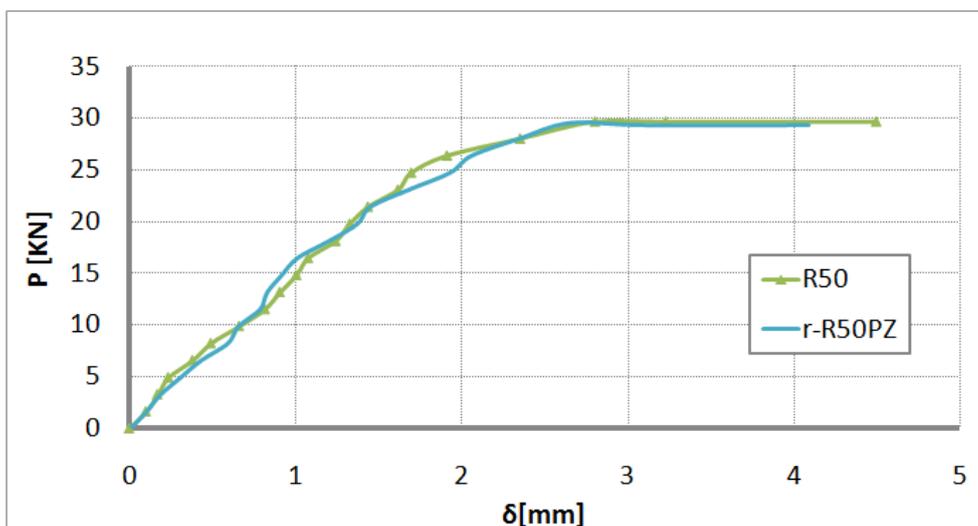
ولمعرفة أثر استخدام البوزولانا كبديل تم مقارنة علاقة قوة - انتقال لجوائز المجموعة SI مع جوائز المجموعة SII كل نسبة على حدا، حيث تم في الشكل (5-32) مقارنة الجوائز مع ركام طبيعي فقط، أما الشكل (5-33) فتم فيه مقارنة الجوائز من المجموعتين بمحتوى 50% من الركام المعاد تدويره، وأخيراً الشكل (5-34) فكانت المقارنة بين الجوائز بمحتوى 100% من الركام المعاد تدويره.



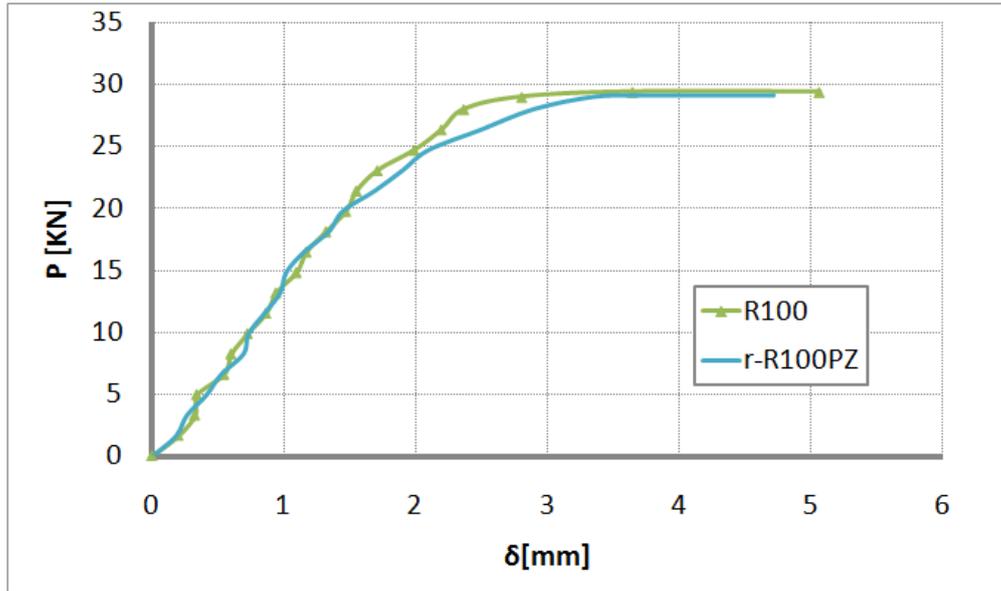
الشكل (31-5) علاقة قوة - انتقال لجوانز المجموعة الأولى SII وهم r-R0PZ ، r-R50PZ ، r-R100PZ.



الشكل (32-5) مقارنة علاقة قوة- انتقال بين R0 و r-R0PZ



الشكل (33-5) مقارنة علاقة قوة- انتقال بين R50 و r-R50PZ



الشكل (34-5) مقارنة علاقة قوة- انتقال بين R100 و r-R100PZ

يلاحظ من جميع الأشكال السابقة التقارب الكبير بين منحنيات المجموعة SI مع مقابلتها من المجموعة SII في حمل الانهيار ولكن الانتقال الذي حدث عنده الانهيار في جوائز المجموعة SII كان أقل من نظيرتها في SI بحدود 10%. قد يفسر ذلك بأن مقاومة الشد للمجموعة SII كانت أخفض من المجموعة SI وبالتالي تشققت الخرسانة بشكل أسرع وحدث الانهيار عند انتقال أقل.

مما سبق يمكن القول أن استخدام البوزولانا كبديل عن الاسمنت بنسبة 15% ممكن كونه أعطى نفس حمل الانهيار من أجل جميع نسب الركام المعاد تدويره المستخدمة. يعود ذلك لكون الانهيار الحاصل على الشد وبالتالي التسليح هو المسيطر على شكل وحمل الانهيار

6.5 الخلاصة:

اتضح من خلال هذا الفصل أن الركام المعاد تدويره بدون إضافات غير ملائم لاستخدامات الإنشائية بسبب انخفاض الخصائص الميكانيكية وبالتالي يعتبر مناسباً أكثر للاستخدامات الغير إنشائية كأعمال الطرق وصنع البلوك والجدران الغير حاملة والسدود الكتلية وغيرها، وظهر من خلال النتائج أن الأداء على الضغط كان متشابهاً سواء استخدم الاسمنت البورتلاندي أو الاسمنت البورتلاندي البوزولاني مع نسبة 15% للبوزولانا. ساهم إدخال البوزولانا الطبيعية كإضافة بنسبة 15% من وزن الاسمنت على الخلطات المحضرة من ركام معاد تدويره في رفع مقاومة الضغط، وكان لذلك أثر إيجابي حيث تم الوصول إلى مقاومات شبيهة بالخلطات بركام طبيعي بدون إضافات عندما اعتمد خليط من الركام المعاد تدويره بنسبة 50%. يتطلب السماح باستخدام الركام المعاد تدويره في العناصر الإنشائية دراسات واسعة تدرس كل ما يتعلق بالسلوك الإنشائي وكخطوة على هذا الطريق تم في هذا الفصل دراسة سلوك الجوائز على الانعطاف مع نسب تسليح 0.5% وتبين أن الركام المعاد تدويره لم يؤثر على قدرة تحمل الجوائز ولكن انخفاض معامل المرونة طردياً مع النسبة المستخدمة من RA أدت إلى تشكل سهم أكبر في منتصف الجوائز وهذا أمر يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار عند استخدام هذه المادة.

الفصل السادس

علاقة تجريبية لمعامل المرونة في الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره *Empirical Equation to Estimate Modulus of Elasticity of RAC*

1.6 مقدمة:

Introduction

تم بداية في هذا الفصل مقارنة القيم التجريبية لمعامل المرونة لخرسانة منتجة من ركام معاد تدويره بدون إضافات مع القيم التي تعطىها علاقات معامل المرونة بحسب بعض الكودات أو بحسب علاقات قدمها بعض الباحثين. ومن ثم تم اقتراح علاقة تجريبية تناسب نتائج البحث من أجل خرسانة بدون إضافات في اليوم 28 وذلك انطلاقاً من علاقات سابقة بعد إدخال عوامل تخفيض تتعلق بالوزن الحجمي للخرسانة ومقاومتها على الضغط. تم تطبيق العلاقة المقترحة في هذه الدراسة وعلاقات باحثين آخرين على نتائج أبحاث تجريبية سابقة. دلت النتائج أن العلاقة المقترحة كانت جيدة للتنبؤ بمعامل المرونة للخرسانة بركام معاد تدويره.

2.6 علاقات معامل المرونة وفق بعض المراجع:

Equations for Modulus of Elasticity According to Some References

يعتمد معامل المرونة بشكل كبير على مقاومة الضغط وعلى النسبة الحجمية للركام في الخلطة وكذلك على نوع الركام ومعامل مرونته، وفي حال استخدام الركام المعاد تدويره فإن معامل المرونة يكون أخفض من حالة استخدام الركام الطبيعي، حيث أن الركام الذي يحوي مسامات أكثر ينتج خرسانة أكثر لدونة (Etxeberria, 2007). يدخل في معظم العلاقات التي يُحسب من خلالها معامل المرونة للخرسانة من ركام طبيعي مقاومة الضغط والوزن الحجمي كما في الكود الأمريكي (1992) ACI 318/318R وأيضاً الكود البريطاني (1985) BS 8110، أيضاً فإن علاقات أخرى في بعض الكودات كـ (2004) BS EN 1992-1 والكود السوري (الطبعة الثالثة، 2004) معامل المرونة يتبع فيها فقط لمقاومة الضغط. فيما يلي نستعرض شكل العلاقات والعوامل الداخلة في علاقات هذه الكودات :

• الكود الأمريكي (1992) ACI 318/318R:

$$E_c = 0.043 * \rho^{1.5} f_c^{0.5} \quad (\text{MPa}) \quad (1-6)$$

وتبسط هذه العلاقة من أجل الخرسانة العادية لتصبح

$$E_c = 4700 f_c^{0.5} \quad (\text{MPa}) \quad (2-6)$$

- الكود البريطاني (1985) BS 8110

$$E_c = 1.7 * 10^{-6} * \rho^2 f_{cu}^{0.33} \text{ (GPa)} \quad (3-6)$$

- قَدَم الكود الأوروبي (2004) BS EN 1992-1 علاقة مبسطة هي:

$$E_c = 22 * (f_c/10)^{0.3} \text{ (GPa)} \quad (4-6)$$

- أما الكود السوري (2004) فيعتمد العلاقة التالية لحساب معامل المرونة:

$$E_c = 6644 * \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \quad (5-6)$$

حيث:

E_c : معامل المرونة للخرسانة.

ρ : الوزن الحجمي للخرسانة مقدرة بـ Kg/m^3 .

f_c : المقاومة الخرسانية الاسطوانية في الضغط مقدرة بـ MPa .

f_{cu} : المقاومة الخرسانية المكعبية في الضغط مقدرة بـ MPa .

من جانب آخر كان هناك محاولات عدة من قبل الباحثين للوصول إلى علاقات يمكن من خلالها التنبؤ بمعامل المرونة للخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره، وقد تمكن بعضهم من تقديم إما علاقات تتعلق فقط بالمقاومة على الضغط (Dhir et al, 1999) أو تتعلق بالإضافة لمقاومة الضغط بالوزن الحجمي للخرسانة كما عند (Kakizaki et al, 1988; Zilch & Roos, 2001) وفيما يلي استعراض لشكل هذه العلاقات بحسب ما ورد عند (Corinaldesi, 2010):

- علاقة (Dhir et al, 1999)

$$E_c = 370 * f_{cu} + 13100 \text{ (MPa)} \quad (6-6)$$

- علاقة (Kakizaki et al, 1988) من أجل RAC:

$$E_c = 1.9 * 10^5 * (\rho / 2300)^{1.5} * (f_{cu} / 2000)^{0.5} \text{ (MPa)} \quad (7-6)$$

- علاقة (Zilch & Roos, 2001) في حالة RAC:

$$E_c = 9100 * (f_{cu} + 8)^{\frac{1}{3}} * (f_{cu} / 2400)^2 \quad (\text{MPa}) \quad (8-6)$$

حيث :

E_c : معامل المرونة للخرسانة.

ρ : الوزن الحجمي للخرسانة مقدرة بـ Kg/m^3 .

f_c : المقاومة الخرسانية الاسطوانية في الضغط مقدرة بـ MPa .

f_{cu} : المقاومة الخرسانية المكعبية في الضغط مقدرة بـ MPa .

يوضح الجدول (1-6) مقارنة بين قيم معامل المرونة المحسوبة وفق العلاقات السبعة المذكورة آنفاً وبين القيم التجريبية الناتجة في هذا البحث والموضحة في الجدول (5-5)، يتبين من خلال المقارنة أن علاقات الكودات في معظمها غير مناسبة لحساب معامل المرونة في حالة الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره وخاصة تلك التي يقدمها الكود السوري حيث أعطت أعلى القيم بالمقارنة مع باقي العلاقات .

كانت القيم الناتجة عن كل من علاقة الكود الأمريكي وعلاقة (Dhir et al, 1999) و (Kakizaki et al, 1988) قريبة جداً من بعضها وأيضاً الأكثر قرباً من نتائج هذا البحث، وقد تضمنت هاتين العلاقتين متغيرات تتعلق بالوزن الحجمي والمقاومة على الضغط، لذلك تم اعتماد نفس المتغيرات كعوامل تخفيض عند اقتراح علاقة لحساب معامل المرونة لخرسانة منتجة من ركام معاد تدويره كما سيرد في الفقرة التالية.

الجدول (1-6) مقارنة بين قيم معامل المرونة المحسوبة في الكودات وعدد من الباحثين وبين القيم التجريبية لهذا البحث

| E_c (GPa) | | | | | | | | f_{cu} (MPa) | ρ (Kg/m ³) | رمز الخلطة |
|-----------------------|--------------------|----------------|------------------|--------------|--------------|---------------|----------------|-------------------|--------------------------------|---------------|
| Zilch&Roose (2001) | Kakizaki (1988) | Dhir (1999) | السوري (2004) | EN (2004) | BS (1985) | ACI (1992) | هذه الدراسة | | | |
| 32.8 | 27.8 | 26.8 | 36.2 | 30.5 | 32.6 | 27.8 | 30.9 | 37.1 | 2414 | R0 |
| 30.7 | 25.8 | 25.7 | 34.7 | 29.7 | 30.5 | 25.8 | 25.3 | 34 | 2366 | R50 |
| 29.6 | 24.6 | 24.9 | 33.6 | 29.1 | 29.2 | 24.6 | 22.8 | 31.9 | 2341 | R75 |
| 29.4 | 24.5 | 24.9 | 33.6 | 29.2 | 29.1 | 24.5 | 22.1 | 32 | 2334 | R100 |

3.6 العلاقة المقترحة:

Proposed Equation

تم في هذا البحث اقتراح علاقة تناسب نتائج البحث بمعنى أن العلاقة صممت لخرسانة لا تتجاوز فيها المقاومة المكعبية على الضغط 50 MPa ونسبة الماء للاسمنت لا تقل عن 0.4.

يتضح من الجدول (1-6) أنه من أجل خرسانة بركام طبيعي R0 فإن معامل المرونة المحسوب من علاقة BS (2004) EN 1992-1 أعطى قيمة مساوية تقريباً للقيمة التجريبية في هذا البحث، لذلك تم الانطلاق من علاقة الكود

(2004) BS EN 1992-1 وإدخال معاملات تخفيض تتعلق بالوزن الحجمي ومقاومة الضغط للخلطة المدروسة وبعد عدة محاولات تم التوصل إلى الشكل الأمثل وهو كما يلي:

$$E_c = 22 * (f_c/10)^{0.3} * (f_c / f_{c0}) * (\rho / (\rho_0 + 100)) \text{ (GPa)} \quad (9-6)$$

حيث :

E_c : معامل المرونة للخرسانة.

f_c : مقاومة الخرسانة الاسطوانية في الضغط مقدرة بـ MPa وتم حسابها بضرب المقاومة المكعبية بمعامل تغيير الشكل 0.8 بحسب ما ينصه الكود العربي السوري، حيث أوضحت عدد من الدراسات أن معاملات تصحيح الشكل لا تتغير من أجل RAC (Waleed & Canisius, 2007).

f_{c0} : مقاومة الخرسانة الاسطوانية لخرسانة من ركام طبيعي مقدرة بـ MPa .

ρ : الوزن الحجمي للخرسانة المراد إيجاد معامل المرونة لها مقدرة بـ Kg/m^3 .

ρ_0 : الوزن الحجمي للخرسانة بركام طبيعي مقدرة بـ Kg/m^3 .

تجدر الإشارة هنا إلى ما تم ذكره في الفقرة 2-5-2 بأنه عند إضافة 100 Kg/m^3 إلى الوزن الحجمي ρ فإننا نحصل على الوزن الحجمي الرطب (NCS,2009).

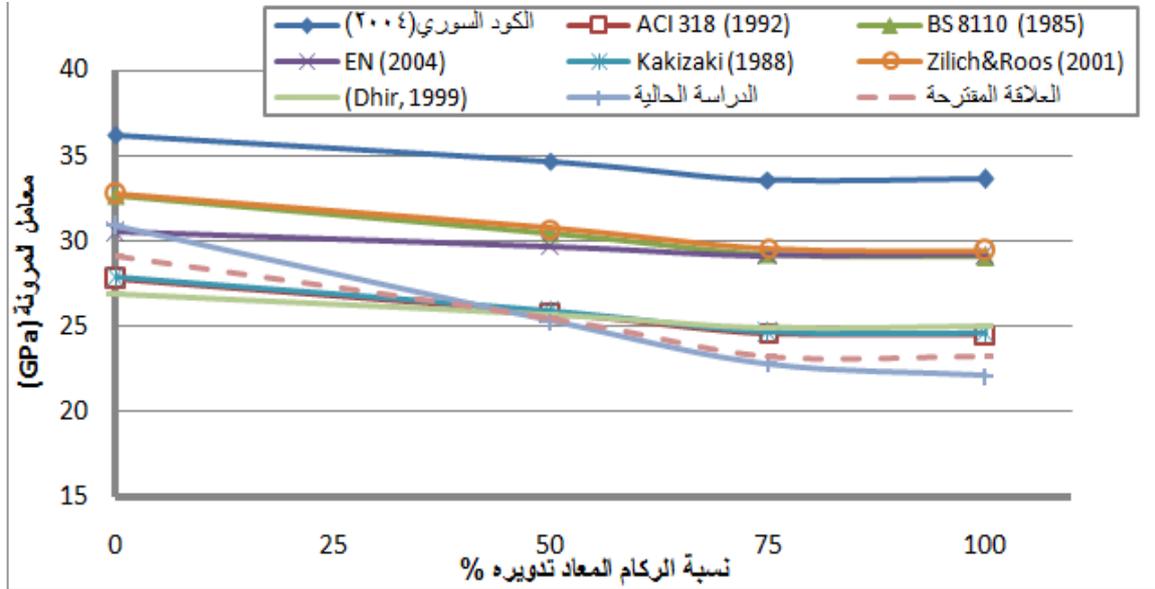
تم حساب قيم معامل المرونة من العلاقة المقترحة بحسب بارامترات هذه البحث و مقارنتها مع القيم التجريبية وإدراجها في الجدول (2-6) حيث لم يتجاوز الفرق بينهما 6%، ومن أجل R50 كان التقارب كبير جدا بفارق لا يتجاوز 1%.

الجدول (2-6) مقارنة بين معامل المرونة من العلاقة المقترحة والقيم التجريبية

| الفرق عن نتائج البحث كنسبة مئوية | معامل المرونة (GPa) | | %RA | رمز الخلطة |
|----------------------------------|---------------------|-------------|-----|-------------|
| | العلاقة المقترحة | نتائج البحث | | |
| -6% | 29.1 | 30.9 | 0 | R0 |
| 1% | 25.5 | 25.3 | 50 | R50 |
| 2% | 23.2 | 22.8 | 75 | R75 |
| 5% | 23.2 | 22.1 | 100 | R100 |

يوضح الشكل (1-6) المنحنيات التي تمثل قيم معامل المرونة وفق الكودات ووفق علاقات الباحثين الثلاثة السابق ذكرها، وأيضا تم رسم منحنى يمثل القيم التجريبية في هذه الدراسة وآخر يمثل العلاقة المقترحة، يظهر من هذا الشكل أنه من أجل خرسانة تحوي ركام معاد تدويره فإن العلاقة المقترحة كانت الأقرب للنتائج التجريبية لهذا البحث وخاصة من أجل R50 حيث الفارق لم يتعد 1%.

ما يمكن ملاحظته من الشكل (1-6) التقارب الكبير جدا بين علاقة الكود البريطاني (BS 8110 (1985) وبين علاقة (Zilich& Roose, 2001)، وأيضا التقارب لدرجة الانطباق بين الكود الأمريكي (ACI 318/318R (1992) وعلاقة (Kakizaki, 1988).



الشكل (1-6) قيم معامل المرونة من أجل بارامترات هذا البحث وفق الكودات ووفق علاقات أخرى

4.6 مقارنة العلاقة المقترحة مع نتائج أبحاث تجريبية أخرى:

Comparison the Proposed Equation with other Experimental Research

تم تطبيق العلاقة المقترحة في هذا البحث على نتائج بعض الدراسات السابقة التي تم الإطلاع عليها حتى يتم التأكد أكثر من صحتها وإمكانية الحصول على قيم توافق النتائج التجريبية. يوضح الجدول (3-6) الدراسات التي تم العودة لها مع المعطيات اللازمة من كل بحث لإتمام الحسابات وجميعها كان مع W/C لا تقل عن 0.4 ولا تتجاوز 0.6 حتى تكون مقاومات الضغط التي تم الحصول عليها عادية قدر الإمكان.

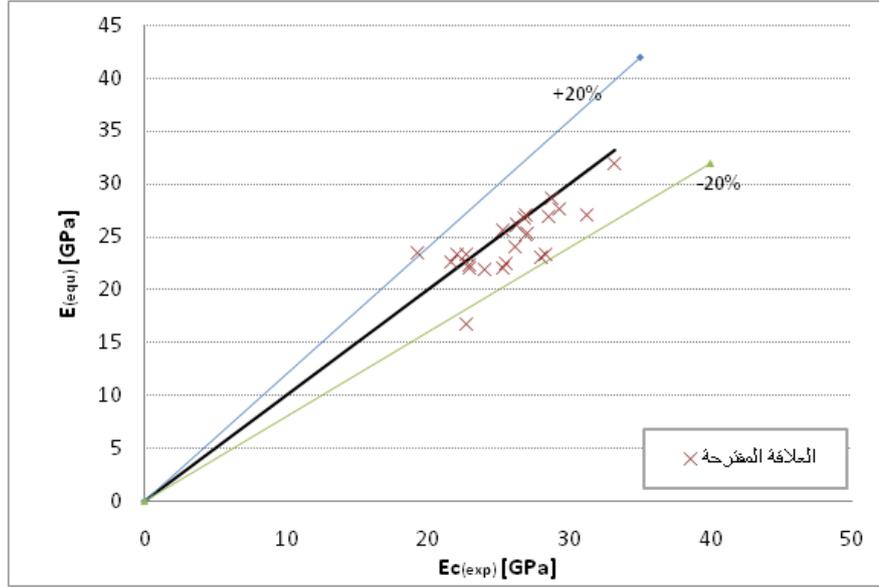
وتم حساب معامل المرونة بحسب العلاقة المقترحة $E_{c(equ)}$ كما تمت مقارنته مع معامل المرونة الذي تم إيجاده تجريبياً $E_{c(exp)}$ من خلال وضع عمود يمثل الفرق بين $E_{c(equ)}$ و $E_{c(exp)}$ كنسبة مئوية من $E_{c(equ)}$. وكون هذه العلاقة خاصة بالخرسانة من ركام معاد تدويره تم استثناء الحالات التي RA فيها مساوية للصفر والموافقة لخرسانة بركام طبيعي.

إن أكثر قيمة شاذة هي الموافقة لـ R100 في دراسة (Kumutha&Vijai, 2010) ويفسر ذلك بشذوذ قيمة مقاومة الضغط لها عن باقي القيم الناتجة في هذه الدراسة كما هو واضح في الجدول (3-6).

الجدول (3-6) مقارنة معامل المرونة التجريبي $E_c(\text{exp})$ مع معامل المرونة المقابل المحسوب من العلاقة المقترحة $E_c(\text{equ})$ من أجل عدد من الأبحاث السابقة

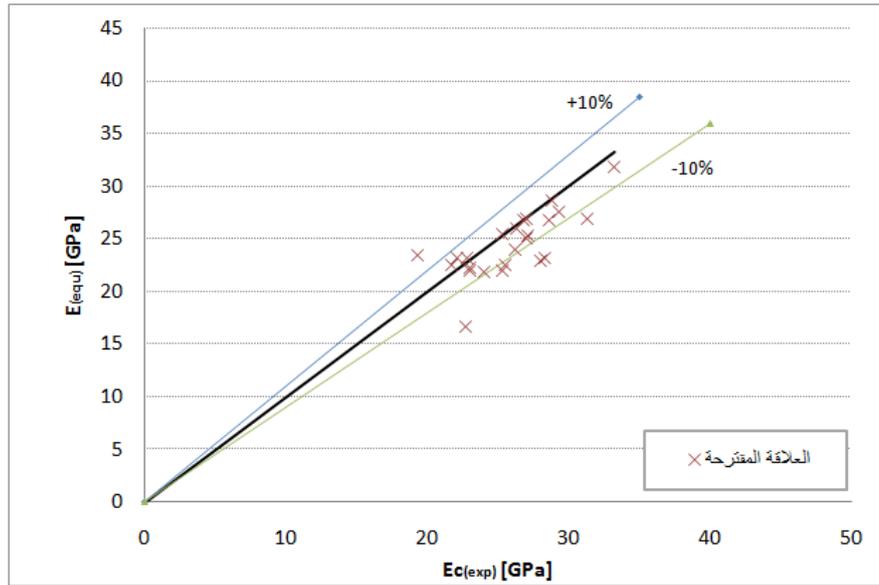
| Refrence | W/C | RA | ρ | f_{cu} | f_c | $E_c(\text{exp})$ | $E_c(\text{equ})$ | differnce from $E_c(\text{exp})$ |
|--------------------------|------|-----|----------------------|----------|-------|-------------------|-------------------|-------------------------------------|
| | | [%] | [Kg/m ³] | [MPa] | [MPa] | [GPa] | [GPa] | |
| (Arundeb et al, 2011) | 0.4 | 0 | 2321 | 47 | 37.60 | 24 | — | |
| | | 100 | 2228 | 36.88 | 29.50 | 23 | 21.98 | -4% |
| | 0.5 | 0 | 2349 | 38 | 30.40 | 22.6 | — | |
| | | 100 | 2245 | 33 | 26.40 | 19.3 | 23.43 | 21% |
| (Abukersh, 2009) | 0.4 | 0 | 2393 | 69 | 55.20 | 36.28 | — | |
| | | 100 | 2280 | 52 | 41.60 | 28.3 | 23.26 | -18% |
| (Paul, 2011) | 0.5 | 0 | 2427 | 46.57 | 37.26 | 31.75 | — | |
| | | 30 | 2420 | 47.21 | 37.77 | 33.2 | 31.87 | -4% |
| | | 100 | 2335 | 42.43 | 33.94 | 26.8 | 26.76 | -0.1% |
| (Kou, 2005) | 0.55 | 0 | 2315 | 48.6 | 38.88 | 30 | — | |
| | | 20 | 2298 | 45.3 | 36.24 | 28.8 | 28.62 | -1% |
| | | 50 | 2274 | 42.5 | 34.00 | 26.3 | 26.07 | -1% |
| | | 100 | 2265 | 38.1 | 30.48 | 21.7 | 22.53 | 4% |
| (Etxeberria et al, 2007) | 0.55 | 0 | 2420 | 29 | 23.20 | 32 | — | |
| | 0.55 | 20 | 2400 | 29 | 23.20 | 31.3 | 26.97 | -14% |
| | 0.52 | 50 | 2390 | 29 | 23.20 | 28.59 | 26.86 | -6% |
| | 0.5 | 100 | 2340 | 28 | 22.40 | 27 | 25.12 | -7% |
| (Waleed&Canisius, 2007) | 0.55 | 0 | 2320 | 35.2 | 28.16 | 32 | — | |
| | | 30 | 2310 | 34.2 | 27.36 | 29.3 | 27.60 | -6% |
| | | 60 | 2290 | 33.8 | 27.04 | 27 | 26.94 | -0.2% |
| (Kumutha&Vijai, 2010) | 0.5 | 0 | 2610 | 28.25 | 22.60 | 27.7 | — | |
| | | 20 | 2559 | 27.22 | 21.78 | 27.1 | 25.28 | -7% |
| | | 40 | 2510 | 26.54 | 21.23 | 26.2 | 23.99 | -8% |
| | | 60 | 2488 | 25.42 | 20.34 | 25.5 | 22.49 | -12% |
| | | 80 | 2478 | 25.08 | 20.06 | 25.3 | 22.01 | -13% |
| | | 100 | 2454 | 20.43 | 16.34 | 22.7 | 16.69 | -26% |
| (Corinaldesi, 2011) | 0.5 | 0 | 2294 | 51.2 | 40.96 | 34 | — | |
| | | 30 | 2262 | 39.9 | 31.92 | 28 | 22.95 | -18% |
| | 0.55 | 0 | 2276 | 47.1 | 37.68 | 34 | — | |
| | | 30 | 2245 | 36.1 | 28.88 | 24 | 21.90 | -9% |
| | 0.6 | 0 | 2262 | 43.9 | 35.12 | 28 | — | |
| | | 30 | 2230 | 34.7 | 27.76 | 23 | 22.30 | -3% |

تم في الشكل (2-6) مقارنة القيم الناتجة عن العلاقة المقترحة مع القيم الفعلية التجريبية من أجل الأبحاث التي تم العودة إليها ومن أجل النتائج التجريبية لهذه الدراسة. وتم أخذ مجال مقبول $[-20\%, +20\%]$ عن قيم العلاقة التجريبية كما في دراسة (Maruyama et al, 2004; Sato et al., 2007). نلاحظ من الشكل أن معظم النقاط تقع ضمن المجال المقبول ما عدا عدد بسيط لم يتعد الحالتين. وفي حال تم تضيق المجال إلى $[-10\%, +10\%]$ فإن 71% من النقاط يقع ضمن المجال الشكل (3-6)، بالتالي يعتبر هذا مؤشر قوي على صحة العلاقة المقترحة وإمكانية تطبيقها للتنبؤ بشكل تقريبي بمعامل المرونة لخرسانة بركام معاد تدويره.



الشكل (2-6) مقارنة القيم التجريبية للأبحاث المذكورة في الجدول (3-6) مع القيم الناتجة عن العلاقة المقترحة تخطيطياً من أجل مجال

[-20%,+20%]



الشكل (3-6) مقارنة القيم التجريبية للأبحاث المذكورة في الجدول (3-6) مع القيم الناتجة عن العلاقة المقترحة تخطيطياً من أجل مجال

[-10%,+10%]

5.6 مقارنة العلاقة المقترحة مع علاقات سابقة:

Compression between Proposed Equation and Previous Equations

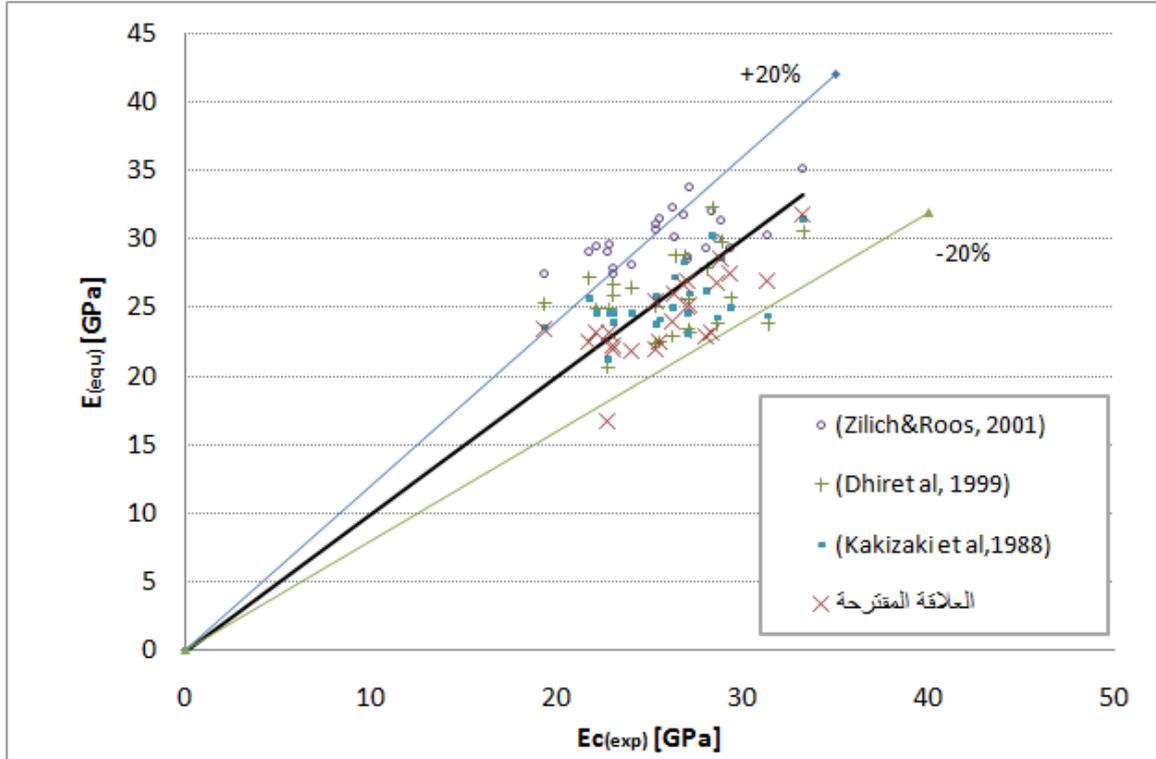
تم تطبيق علاقات الباحثين (Kakizaki, 1988; Zilich &, 2001; Dhir, 1999) من أجل نفس الدراسات المذكورة في الجدول (3-6) وحساب الفرق بين معامل المرونة الناتج عن كل علاقة عن معامل المرونة التجريبي حسب الدراسة المرجعية وأخذها كنسبة مئوية. وتم إدراج النتائج في الجدول (4-6).

الجدول (4-6) قيم معامل المرونة وفق بعض المراجع والعلاقة المقترحة من أجل دراسات سابقة

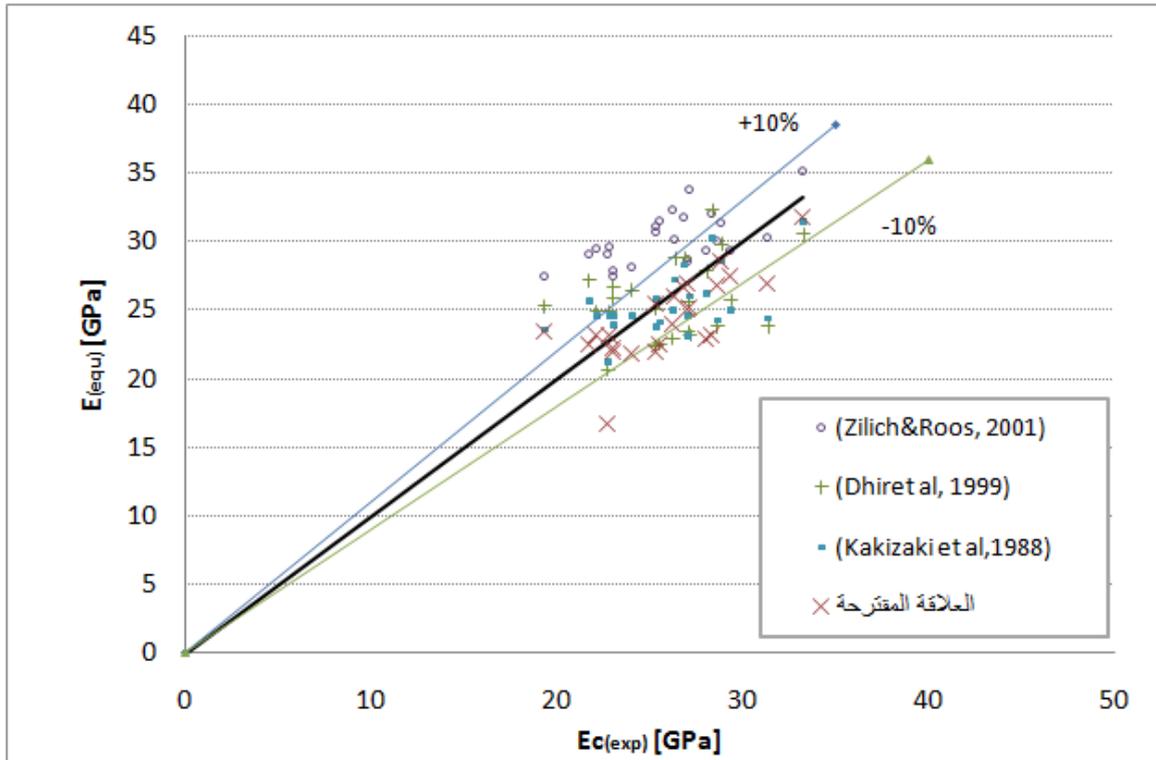
| Reference | W/C | RA | | This study | | Kakizaki et al, (1988) | | Zilich&Roos (2001) | | Dhir et al, (1999) | |
|---------------------------|------|-----|--------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|------------------------|
| | | [%] | [GPa] | Ec(equ) (GPa) | diffrence from Ec(exp) | Ec(equ) (GPa) | diffrence from Ec(exp) | Ec(equ) (GPa) | diffrence from Ec(exp) | Ec(equ) (GPa) | diffrence from Ec(exp) |
| (Arundeb et al, 2011) | 0.4 | 100 | 23 | 21.98 | -4% | 24.60 | 7% | 27.87 | 21% | 26.75 | 16% |
| | 0.5 | 100 | 19.3 | 23.43 | 21% | 23.54 | 22% | 27.46 | 42% | 25.31 | 31% |
| (Abukersh, 2009) | 0.4 | 100 | 28.3 | 23.26 | -18% | 30.24 | 7% | 32.15 | 14% | 32.34 | 14% |
| (Paul, 2011) | 0.5 | 30 | 33.2 | 31.87 | -4% | 31.51 | -5% | 35.23 | 6% | 30.57 | -8% |
| | 100 | | 26.8 | 26.76 | -0.1% | 28.31 | 6% | 31.82 | 19% | 28.80 | 7% |
| (Kou, 2005) | 0.55 | 20 | 28.8 | 28.62 | -1% | 28.56 | -1% | 31.40 | 9% | 29.86 | 4% |
| | | 50 | 26.3 | 26.07 | -1% | 27.23 | 4% | 30.20 | 15% | 28.83 | 10% |
| | | 100 | 21.7 | 22.53 | 4% | 25.63 | 18% | 29.06 | 34% | 27.20 | 25% |
| (Etxeberria et al, 2007) | 0.55 | 20 | 31.3 | 26.97 | -14% | 24.39 | -22% | 30.32 | -3% | 23.83 | -24% |
| | 0.52 | 50 | 28.59 | 26.86 | -6% | 24.23 | -15% | 30.07 | 5% | 23.83 | -17% |
| | 0.5 | 100 | 27 | 25.12 | -7% | 23.07 | -15% | 28.56 | 6% | 23.46 | -13% |
| (Waleed&Canisius, 2007) | 0.55 | 30 | 29.3 | 27.60 | -6% | 25.01 | -15% | 29.35 | 0.2% | 25.75 | -12% |
| | | 60 | 27 | 26.94 | -0.2% | 24.54 | -9% | 28.75 | 6% | 25.61 | -5% |
| (Kumutha&Vijai, 2010) | 0.5 | 20 | 27.1 | 25.28 | -7% | 26.01 | -4% | 33.91 | 25% | 23.17 | -14% |
| | | 40 | 26.2 | 23.99 | -8% | 24.95 | -5% | 32.41 | 24% | 22.92 | -13% |
| | | 60 | 25.5 | 22.49 | -12% | 24.10 | -5% | 31.50 | 24% | 22.51 | -12% |
| | | 80 | 25.3 | 22.01 | -13% | 23.79 | -6% | 31.14 | 23% | 22.38 | -12% |
| | | 100 | 22.7 | 16.69 | -26% | 21.16 | -7% | 29.04 | 28% | 20.66 | -9% |
| (Valeria, 2011) | 0.5 | 30 | 28 | 22.95 | -18% | 26.17 | -7% | 29.36 | 5% | 27.86 | -0.5% |
| | 0.55 | 30 | 24 | 21.90 | -9% | 24.62 | 3% | 28.13 | 17% | 26.46 | 10% |
| | 0.6 | 30 | 23 | 22.30 | -3% | 23.89 | 4% | 27.46 | 19% | 25.94 | 13% |
| this study | 0.55 | 50 | 25.3 | 25.50 | 1% | 25.80 | 2% | 30.70 | 21% | 25.08 | -1% |
| | | 75 | 22.8 | 23.21 | 2% | 24.60 | 8% | 29.60 | 30% | 24.90 | 9% |
| | | 100 | 22.1 | 23.23 | 5% | 24.60 | 11% | 29.45 | 33% | 24.94 | 13% |
| Standard diviation | | | | 0.09 | | 0.11 | | 0.12 | | 0.14 | |

تم كما هو واضح في الجدول (4-6) حساب الانحراف المعياري للفارق المثوي من أجل كل علاقة لمعرفة مدى تباعد أو تقارب القراءات عن وسطها الحسابي، يظهر من النتائج أن الانحراف المعياري للعلاقة المقترحة كان الأقل ومساو لـ 0.09، وبالتالي فإن القيم الناتجة عن العلاقة المقترحة هي الأقل تشتتاً بالمقارنة مع باقي العلاقات.

تم في الشكل (4-6) مقارنة قيم العلاقات المدروسة مع القيم الفعلية التجريبية من أجل الأبحاث التي تم العودة إليها ومن ضمنها النتائج التجريبية لهذه الدراسة، وتم أخذ مجال مقبول $[-20\%, +20\%]$ عن قيم التجريبية. من أجل علاقة (Kakizaki, 1988) فإن عدد الحالات التي تختلف عن معامل المرونة التجريبي بأكثر من 20% هو حالة واحدة فقط، أما علاقة (Zilich, 2001) فكان عدد الحالات التي تجاوز فيها الفرق 20% تسع حالات، في حين أن عددها عند (Dhir, 1999) كان ثلاثة. ولكن عند تضيق المجال إلى $[-10\%, +10\%]$ فإن 67% من القيم وقعت ضمن هذا المجال عند (Kakizaki, 1988) و33% عند كل من (Zilich, 2001) و (Dhir, 1999). أي أن العلاقة المقترحة كانت الأفضل في إعطاء قيم بفارق لا يتجاوز 10% حيث نسبة 71% من القيم وقعت ضمن المجال $[-10\%, +10\%]$ (الشكل 6-5). ما يجدر ذكره أيضاً أن القيم الناتجة عن العلاقة المقترحة تتركز أسفل الخط الممثل للقيم التجريبية وهذا يعتبر لصالح الأمان.

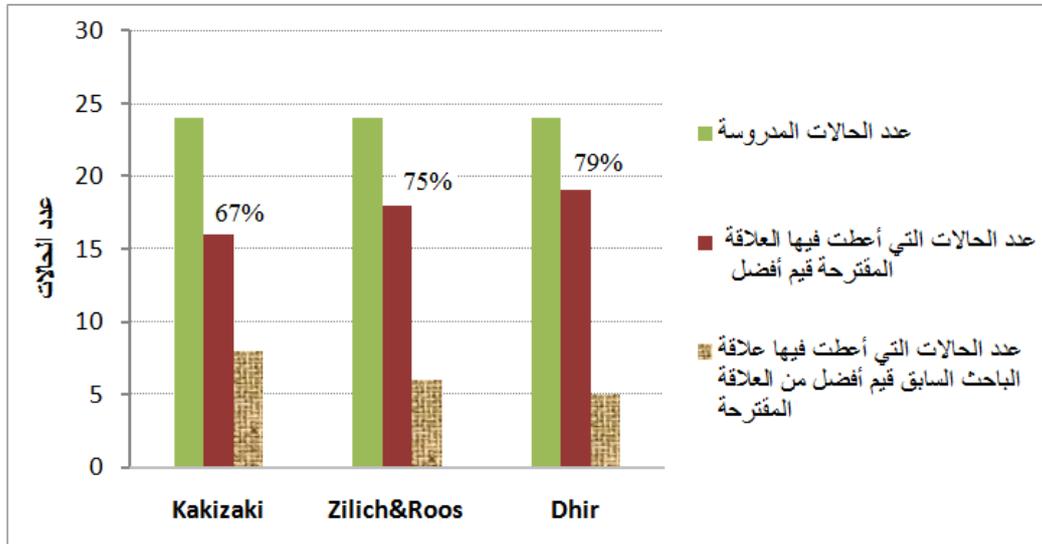


الشكل (4-6) مقارنة قيم العلاقات المدروسة مع القيم الفعلية التجريبية من أجل للأبحاث المذكورة في الجدول (3-6) من أجل مجال [-20%,+20%] عن قيم التجريبية



الشكل (5-6) مقارنة قيم العلاقات المدروسة مع القيم الفعلية التجريبية من أجل للأبحاث المذكورة في الجدول (3-6) من أجل مجال [-10%,+10%] عن قيم التجريبية

بالعودة للجدول (4-6) نلاحظ أنه يحوي على 24 حالة، تم أخذ نتائج العلاقة المقترحة ونتائج كل علاقة من العلاقات الثلاثة على حدا وتم احتساب عدد الحالات التي تكون فيها القيم الناتجة أقرب إلى القيم التجريبية بالمقارنة مع القيمة التي تعطيها العلاقة المقترحة. أعطت علاقة Kakizaki (1988) قيم أقرب للقيم الفعلية في 8 حالات فقط من أصل 24 حالة أما باقي الحالات فكانت القيم الناتجة عن العلاقة المقترحة هي الأفضل، أما علاقة Zilich& Roos (2001) فقد كانت قيمها أقرب للقيم التجريبية بـ 6 حالات فقط، في حين أن علاقة Dhir (1999) أعطت 5 قيم أقرب للقيم التجريبية بالمقارنة مع قيم العلاقة المقترحة. وبالتالي فإن العلاقة المقترحة كانت أقرب للقيم التجريبية بنسبة 67%، 75%، و79% من مجمل الحالات المدروسة بالمقارنة مع Kakizaki (1988)، Zilich& Roos (2001) و Dhir (1999) على الترتيب الشكل (6-6).



الشكل (6-6) عدد الحالات التي أعطت فيها العلاقة المقترحة قيم أقرب للقيم التجريبية بالمقارنة مع Kakizaki (1988) و Zilich& Roos (2001) و Dhir (1999).

مما سبق يمكن القول أنه يمكن اعتماد العلاقة المقترحة للتنبؤ بقيمة تقريبية لمعامل المرونة لخرسانة منتجة من ركام معاد تدويره بمقاومة عادية حيث أوضحت المناقشة السابقة أنها جيدة سواء من ناحية التبعثر أو من ناحية الأمان أو في إعطاء القيمة الأقرب للقيم الفعلية.

6.6 الخلاصة:

يؤثر استخدام الركام المعاد تدويره بشكل واضح على معامل المرونة للخرسانة ويختلف مدى التأثير باختلاف المقاومة المصمم عليها وباختلاف جودة الركام المعاد تدويره المستخدم. لذلك تم في هذا البحث اقتراح علاقة تجريبية لتحديد معامل المرونة يدخل فيها المقاومة على الضغط والوزن الحجمي، وتبين من خلال المقارنات المختلفة أنه يمكن اعتمادها من أجل التنبؤ بقيمة معامل المرونة للخرسانة المحضرة بركام معاد تدويره.

الفصل السابع

الدراسة العددية باستخدام طريقة العناصر المحدودة *The Numerical Study Using FEM*

1.7 مقدمة:

Introduction

تم إجراء التحليل العددي باستخدام برنامج (ABAQUS, V6.12-1) الذي يعتمد طريقة العناصر المحدودة (Finite Element Method, FEM) حيث تم استخدام التحليل اللاخطي الذي يأخذ بعين الاعتبار لاختية المادة (Materially Non-Linear Analysis, MNA)، وتم أخذ أثر التماسك (Bond) بين عناصر النموذج المختلفة بعين الاعتبار.

يتضمن هذا الفصل تحليلاً عددياً باستخدام طريقة العناصر المحدودة لنموذج يحاكي الجوائز المختبرة الموضحة في الفقرة 4-5-5، كما يحتوي على توصيفاً للنموذج المعتمد في التحليل مع الأخذ بعين الاعتبار تعديل بعض مدخلات التحليل من أجل RAC بحسب النتائج والتوصيات التي تم ذكرها في فصل المراجعة البحثية. بالإضافة إلى شرح مفصل لكل ما يتعلق بالتحليل الإنشائي الذي تم إجراؤه باستخدام طريقة العناصر المحدودة، ومن ثم تمت مقارنة نتائج الدراسة التحليلية مع التجريبية في الدراسة الحالية للتحقق من صحة النموذج المعتمد، وعليه تم أخيراً تكبير أبعاد الجائز وتحليله من أجل نسب تسليح مختلفة لدراسة أثر الركام المعاد تدويره على القوة العظمى التي يتحملها الجائز تحليلاً.

2.7 توصيف النموذج

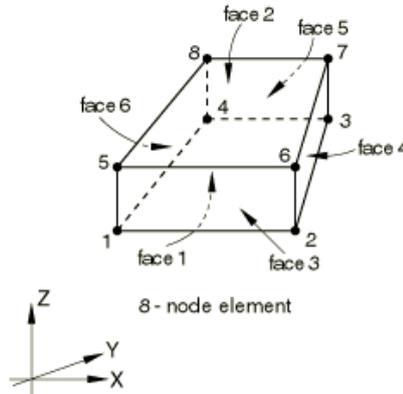
Model Description

تم تحليل الجائز المختبر تجريبياً والذي تم شرحه في الفقرة 4-5-5. والمبين في الشكل (5-28) مجازه 1200 مم وبأبعاد مقطع 170x120 سم، سماكة التغطية (cover) لحديد التسليح السفلي والعلوي 20 مم. تم اعتماد النتائج التجريبية لحساب مقاومة الضغط الاسطوانية المتوسطة للخرسانة (f_{cm} The mean compressive cylinder strength) في اليوم 28 والتي اختلفت باختلاف نسبة RA، حديد التسليح الطولي (Longitude Reinforcement) السفلي 2φ8mm والعلوي 2φ6mm بإجهاد خضوع (Yield Stress) 340 MPa، استخدم حديد تسليح عرضي (Stirrups) بقطر 6mm و بإجهاد خضوع 275 MPa تم توزيعه بحسب ما هو موضح في الشكل (5-28).

3.7 التحليل الإنشائي باستخدام طريقة العناصر المحدودة *Structural Analysis Using Finite Element Method (FEM)*

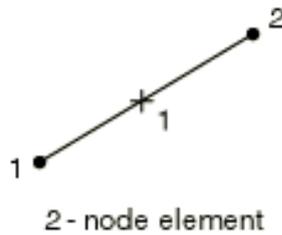
1-3-7 العناصر المستخدمة في النموذج باستخدام برنامج ABAQUS(6.12) *Elements used in the Model Using ABAQUS(6.12)*

تم استخدام العنصر C3D8 (node linear brick-8) لنمذجة الجائز الخرساني، حيث C3D8 هو عنصر فراغي (Solid Section) مؤلف من ثماني عقد و كل عقدة تحوي ثلاث درجات حرية (انتقالات فقط)، ويبين الشكل (1-7) العنصر المستخدم (ABAQUS 6.12 Documentation, 2012).



الشكل (1-7) تمثيل العنصر الفراغي ذو ثماني عقد (ABAQUS 6.12 Documentation, 2012)

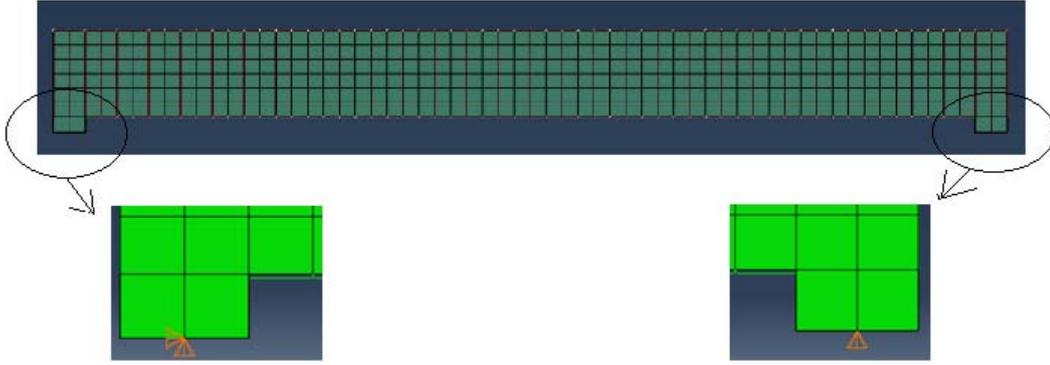
أيضاً تم استخدام العنصر T3D2 (3-D stress/displacement truss elements) لنمذجة التسليح الطولي العلوي والسفلي ولنمذجة الأساور، حيث العنصر T3D2 هو عنصر شبكي فراغي (Truss Element) مؤلف من عقدتين تحتوي كل منهما ثلاث درجات حرية كما هو موضح في الشكل (2-7) (ABAQUS 6.12 Documentation, 2012).



الشكل (2-7) تمثيل العنصر الشبكي الفراغي ذو عقدتين (ABAQUS 6.12 Documentation, 2012)

2-3-7 الشروط المحيطية للنموذج المدروس *Model's Boundary Condition*

تم اعتماد شروط الاستناد في النموذج المدروس كما اعتمدت في التجربة، حيث اعتبر المسند اليساري ثابتاً (Fixed Support) بمنع العقد التي تمثله من الانتقال الشاقولي والأفقي والمسند اليميني متدحرجاً (Roller Support) بمنع العقد في مكانه من الحركة بالاتجاه الشاقولي فقط الشكل (3-7).



الشكل (37-) شروط الاستناد المحيطية

3-3-7 الأحمال المطبقة على النموذج *Applied Loads to the Model*

تم تطبيق حملتين مركزيتين على الجائز كما هو موضح بالشكل (5-28)، في النموذج تم استخدام تعليمة Amplitude والتي من خلالها تحسب القوة من خلال سجل الانتقالات مع الزمن الذي تم تعريفه وفرضه في نقاط تطبيق الحملتين.

4-3-7 نوع التحليل المستخدم في النموذج *Type of Used Analysis*

تم اعتماد تحليل لا خطي يأخذ بعين الاعتبار لا خطية المادة (Materially Non-Linear Analysis, MNA)

5-3-7 آلية عمل المواد المستخدمة في النمذجة *Materials Used in Modeling*

تحتوي قاعدة بيانات برنامج (ABAQUS 6.12) ثلاث طرق مختلفة لنمذجة الخرسانة وهي (ABAQUS Concrete Smeared Cracking Model -1
Cracking Model for Concrete (Brittle Cracking Model -2

Concrete Damage Plasticity -3

تستخدم هذه الطرق من أجل نمذجة الخرسانة لجميع أنواع المنشآت بما فيها الجوائز (Beams)، العناصر الشبكية (Trusses)، العناصر القشرية (Shells)، و العناصر الفراغية (Solids)، كما و تستخدم من أجل نمذجة الخرسانة (Plain concrete)، و بشكل أساسي من أجل الخرسانة المسلحة (Reinforced concrete). تستخدم طريقة (Concrete Smeared Cracking Model) من أجل الخرسانة المعرضة لحمولات متزايدة باتجاه واحد (Monotonic load)، ولا تصلح للحمولات الدورية (Cyclic load)، أما طريقة (Brittle Cracking Model) فتستخدم فقط من أجل نمذجة المواد ذات التشقق الهش حيث تسيطر تشققات الشد (Tensile cracking) على عمل العنصر، بينما لا أهمية لانهايار الضغط.

بالنسبة لطريقة (Concrete Damage Plasticity, CDP) والتي بواسطتها يمكن إجراء التحليل اللاخطي لمادة الخرسانة، فهي تستخدم في حالات التحميل الرتيب (Monotonic loading) – حالة البحث- ومن أجل الأحمال الديناميكية (Dynamic loads)، والأحمال الدورية (Cyclic Loads)، حيث يتم الأخذ بعين الاعتبار تأثير إزالة القوة و التناقص التدريجي في الصلابة المرنة (Elastic Stiffness) في حالي الشد والضغط بسبب التشوهات اللدنة، أيضاً يأخذ بعين الاعتبار آثار استرداد القساوة المرنة (Recovery of the Elastic Stiffness) تحت تأثير الحمل الدوري (Cyclic Loading).

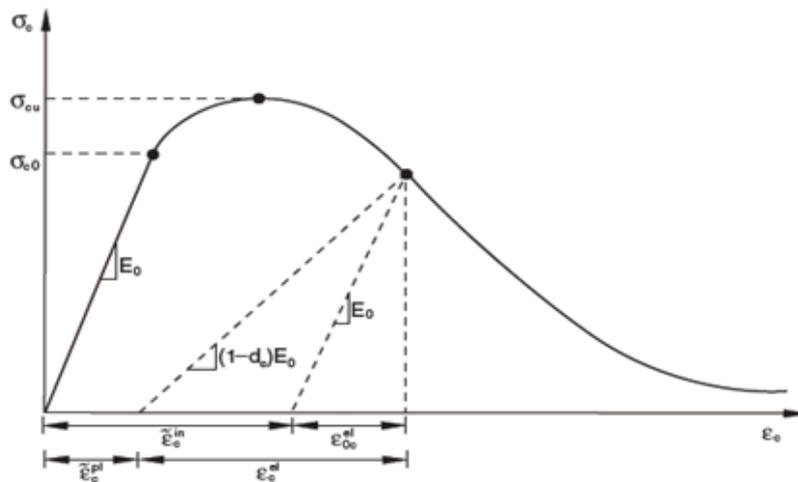
تم الاستعانة في هذا البحث بطريقة (Concrete Damage Plasticity, CDP) كونها تستخدم من أجل نمذجة الخرسانة وجميع المواد الهشة لمختلف العناصر الإنشائية، و إجراء التحليل اللا خطي لمادة الخرسانة. ولإستخدام طريقة CDP يطلب برنامج (ABAQUS 6.12) إدخال منحنيات يتم من خلالها معرفة تصرف الخرسانة في حالة الضغط الأحادي المحور وفي حالة الشد الأحادي المحور.

وتم فيما يلي توضيح لهذه المنحنيات والبارامترات التابعة لها والتي يجب إيجادها وإدخالها في ملف الإدخال (Input file) للنموذج على الشكل التالي:.

أ- تصرف الخرسانة في حالة الضغط الأحادي المحور

Concrete Uni-axial Compression behavior

يوضح الشكل (4-7) منحنى الإجهاد-التشوه على الضغط المحوري (Concrete Uni-axial Compression) لطريقة CDP حيث يمثل المحور الأفقي التشوه النسبي للخرسانة على الضغط ϵ_c بينما يمثل المحور الشاقولي إجهاد الضغط في الخرسانة σ_c ، ويكون سلوك الخرسانة على الضغط خطياً حتى الوصول إلى الخضوع الإبتدائي (Initial Yield) عند قيمة الإجهاد الإبتدائي σ_{co} (Initial Stress)، يبدأ بعدها السلوك اللامرن للمادة (Inelastic behavior)، حيث توصف المرحلة التالية بمرحلة التقسية الإجهادية (Stress Hardening) حيث تستمر الإجهادات والتشوهات بالازدياد بشكل لا خطي حتى الوصول إلى القيمة الحدية لإجهاد للخرسانة على الضغط σ_{cu} (Ultimate Stress). بعدها تبدأ الإجهادات بالانخفاض مع استمرار تزايد التشوهات تسمى هذه المرحلة بـ (Strain Softening) حتى حدوث الانهيار.



الشكل (47-) مخطط الإجهاد - التشوه النسبي على الضغط (ABAQUS 6.12 Documentation, 2012)

يتضح من المنحني أنه عند إزالة الحمولة عند أي نقطة من المرحلة (Strain Softening) من منحني الإجهاد - التشوه على الضغط تتناقض قساوة المادة حيث يتم التعبير عن انخفاض القساوة بالمعامل d_c الذي يسمى معامل تخفيض القساوة على الضغط (Uniaxial compression damage variabl) ، حيث يأخذ قيمة ابتداءً من الصفر للتعبير عن المادة غير المتشوهة إلى الواحد عندما تفقد المادة كامل مقاومتها، حيث يعبر الخط المنقط ذي الميل $E_0(1-d_c)$ في الشكل (4-7) عن حالة إزالة الحمولة حيث تسلك الخرسانة سلوكاً لدناً وبالمقارنة مع الخط المنقط الذي يعبر عن سلوك المادة المرنة عند إزالة الحمولة ذي الميل E_0 الممثل لمعامل المرونة الابتدائي (Initial modulus of elasticity). يمكن ملاحظة انخفاض ميل الخط المنقط الأول إلى $E_0(1-d_c)$ بمقدار d_c وهذا ناتج عن انخفاض قساوة المادة عند إزالة الحمولة بسبب ظهور تشوهات الضغط اللدنة المتبقية في المادة (Compressive Equivalent Plastic Strain) التي تعطي بالعلاقة :

$$\varepsilon_c^{pl} = \varepsilon_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (1-7)$$

حيث ε_c^{in} هو تشوه الضغط غير المرنة (Compressive Inelastic Strain) ، وهو الفرق بين التشوه الكلي الحاصل عند نقطة معينة ε_c من منحني الإجهاد- التشوه على الضغط غير المحوري والتشوه المرنة عند هذه النقطة ε_{0c}^{el} (Elastic Strain) الذي ينتج من تقسيم إجهاد الضغط الناتج عن النقطة المذكورة σ_c على معامل المرونة الابتدائي E_0 كما يلي:

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{0c}^{el} \quad (2-7)$$

$$\varepsilon_{0c}^{el} = \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (3-7)$$

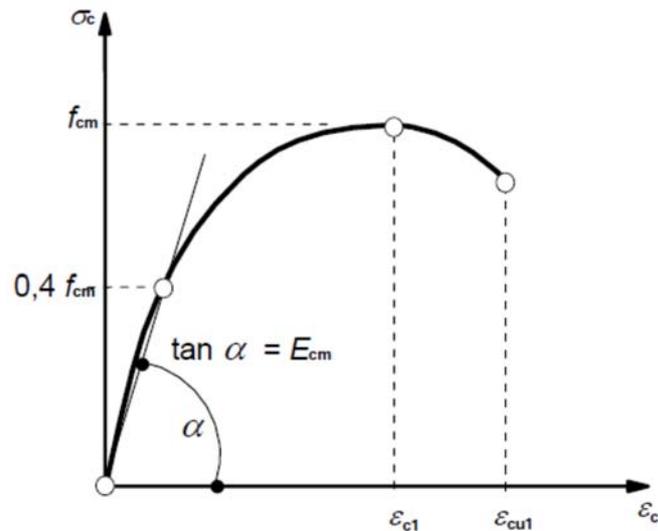
أما d_c فيعطي بالعلاقة وفق (Jankowiak and Lodygowski , 2005) :

$$d_c = \frac{\sigma_{cu} - \sigma_c}{\sigma_{cu}} \quad (4-7)$$

ولإيجاد المنحنيات التي تمثل تصرف الخرسانة على الضغط في هذه الدراسة والتي تلي متطلبات البرنامج تم التمييز بين الحالات الثلاثة في البحث وهي خرسانة منتجة من ركام طبيعي، خرسانة منتجة من ركام معاد تدويره بنسبة 100% وأخرى بنسبة 50%، وسيتم ذكرهم تبعاً:

• خرسانة منتجة من ركام طبيعي R0:
Natural Aggregate Concrete R0

تقدم معظم الكودات منحنيات للخرسانة المنتجة من ركام طبيعي وتم الاعتماد على مخطط الإجهاد - التشوه للخرسانة على الضغط وفق الكود الأوربي (Eurocode2 , 2004) كما هو واضح في الشكل (5-7)، حيث تكون علاقة الإجهاد - التشوه للخرسانة على الضغط علاقة خطية مرنة حتى وصول قيمة الإجهاد إلى $0.4 f_{cm}$ حيث f_{cm} هي المقاومة المتوسطة الاسطوانية للخرسانة على الضغط (Mean value of concrete cylinder Compressive strength) و يعبر ميل العلاقة الخطية في الجزء الأول من المنحني عن معامل المرونة الأولى للخرسانة E_{cm} (Initial modulus of elasticity of concrete). ومن ثم يتحول سلوك المادة إلى سلوك لا مرن (Inelastic behavior) حتى الوصول إلى المقاومة f_{cm} والتي يقابلها التشوه النسبي ϵ_{c1} (Compressive strain in the concrete at the peak stress f_{cm})، تنخفض بعدها المقاومة وصولاً إلى الانهيار عند التشوه النسبي الحدي للخرسانة ϵ_{cu1} (Ultimate compressive strain in the concrete).



الشكل (5-7) مخطط الإجهاد - التشوه للخرسانة على الضغط وفق الكود الأوربي (Eurocode2 , 2004) (مكرر)

تم الاعتماد على مخطط الإجهاد - التشوه للخرسانة على الضغط وفق الكود الأوروبي (Eurocode2 , 2004) لتوصيف التصرف على الضغط للخرسانة المنتجة من ركام طبيعي R0 بالشكل التالي:

f_{cm} : مقاومة الاسطوانية المتوسطة وبلغت قيمتها بحسب النتائج التجريبية 29.68 MPa.

E_{cm} : عامل المرونة اللحظي التقريبي للخرسانة 30900MPa وذلك بحسب النتائج التجريبية.

ϵ_{c1} : التشوه النسبي للخرسانة على الضغط المقابل لذروة الإجهاد f_{cm} ويساوي 0.2% ونتج من تطبيق علاقة (Eurocode2, 2004):

$$\epsilon_{c1} = 0.7 f_{cm}^{0.31} \leq 2.8 \quad (\%) \quad (7-5)$$

ϵ_{cu1} : التشوه النسبي الحدي للخرسانة على الضغط تعتمد قيمته في النمذجة 0.35%.

ν_c : معامل بواسون للخرسانة تم افتراض قيمته 0.2 وفق الكود الأوروبي (Eurocode2 , 2004)

ومن أجل تحديد قيم إجهادات الضغط لنقاط منحنى الإجهاد - التشوه النسبي للخرسانة عند قيم متتالية للتشوهات ابتداءً من الصفر وصولاً لقيمة التشوه الحدي للخرسانة ϵ_{cu1} ، أي بحيث قيم التشوهات ضمن المجال $0 < |\epsilon_c| < |\epsilon_{cu1}|$ الشكل (6-7)، تم استخدام العلاقة (6-7) التي تربط إجهاد الضغط مع التشوه النسبي في الخرسانة وفق الكود الأوروبي (Eurocode2 , 2004):

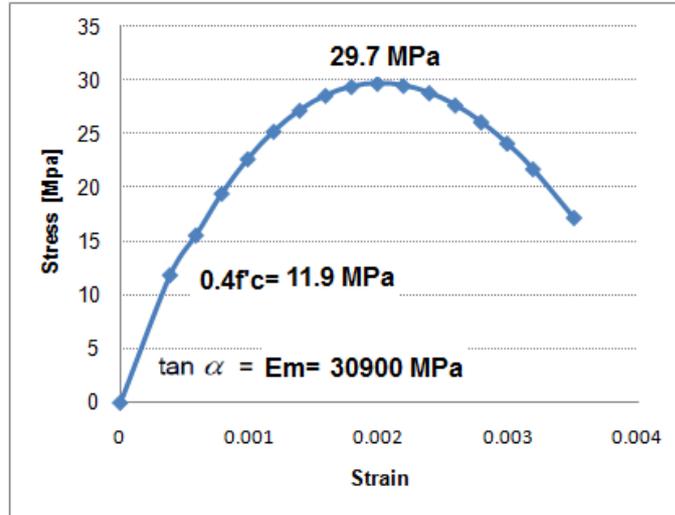
$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{K\eta - \eta^2}{1 + (K - 2)\eta} \quad (6-7)$$

$$\eta = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \quad (7-7)$$

حيث: ϵ_c التشوه النسبي للخرسانة على الضغط عند النقطة المدروسة، K معامل يعطى بالعلاقة:

$$K = \frac{1.05 E_{cm} |\epsilon_{c1}|}{f_{cm}} \quad (8-7)$$

وبحسب ما ذكر أعلاه تم إيجاد منحنى إجهاد - تشوه للخرسانة على الضغط الخاص بـ R0 الشكل (6-7) والذي اعتمد في النمذجة.



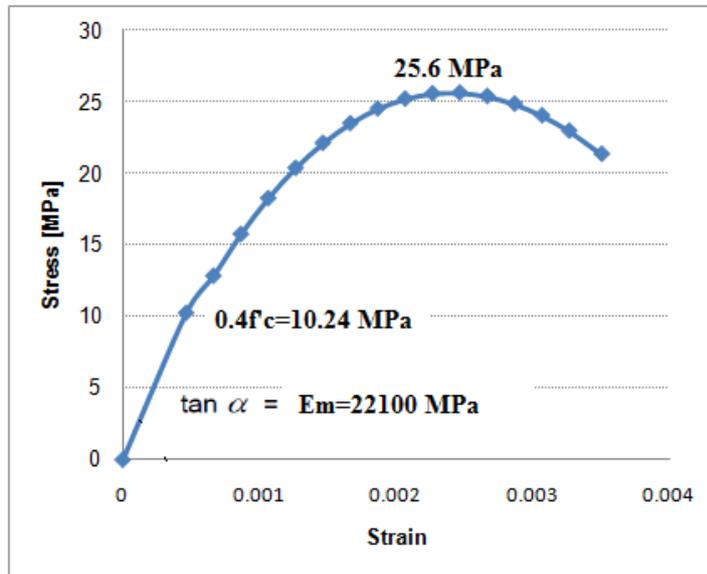
الشكل (67-) منحنى إجهاد - تشوه للخرسانة على الضغط الخاص بـ R0

• خرسانة منتجة من ركام معاد تدويره R100:
Recycled Aggregate Concrete

أوضحت معظم الدراسات كما ذكر في الفصل الثالث (الفقرة 3-5-3) أن شكل منحنى إجهاد- تشوه يبقى نفسه، وأوصت بإيجاده بنفس طريقة الخرسانة بركام طبيعي (Xiao. 2005; Gonzalez et al, 2009; Abukersh,)، ولكن اقترح بعضهم زيادة قيمة ϵ_{c1} التشوه النسبي للخرسانة على الضغط المقابل لذروة الإجهاد f_{cm} عن القيمة التي تنتج في الخرسانة بركام طبيعي لأن طبيعة وبنية الركام المعاد تدويره تسمح بحدوث تشوه أكبر من أجل نفس الحمل. وذهب بعض الباحثين إلى زيادتها بمقدار 20% (Xiao. 2005; Gonzalez et al, 2009) عندما يستخدم نسبة 100% من الركام الخشن المعاد تدويره.

وبالتالي تم إيجاد منحنى إجهاد- تشوه لـ R100 بنفس الطريقة التي سبق ذكرها في R0 حيث f_{cm} مساوية لـ 25.6 MPa و E_{cm} مساوي لـ 22100 MPa ، وتم زيادة ϵ_{c1} بمقدار 20%، أي أصبحت قيمته 0.0024.

يوضح الشكل (7-7) منحنى إجهاد- تشوه الخاص بـ R100 والذي اعتمد في الدراسة التحليلية. ولكن ما يجدر ذكره أن منحنى إجهاد- تشوه الحقيقي للخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره بعد الوصول إلى f_{cm} يكون ميلانه أكثر شدة ويصل إلى قيم أدنى من التي يوضحها الشكل (7-7) وذلك بحسب ما تم عرضه في فصل المراجعة البحثية فقرة 3-5، أي يمكن اعتبار المنحنى المستنتج بأنه يمثل المادة حتى الوصول إلى الإجهاد الأعظمي على الضغط وبعد هذه النقطة يحتاج المنحنى لتعديلات إضافية ويلزم القيام بأبحاث من أجل تحديدها بدقة، تم في هذا البحث المقارنة اعتماداً على قدرة التحمل الأعظمية وبالتالي هذا الأمر لن يؤثر على نتائج التي تم مناقشتها في هذا البحث.



الشكل (77-) منحنى إجهاد- تشوه الخاص بـ R100 (الدراسة الحالية)

• خرسانة منتجة من ركام معاد تدويره R50:
Recycled Aggregate Concrete R50

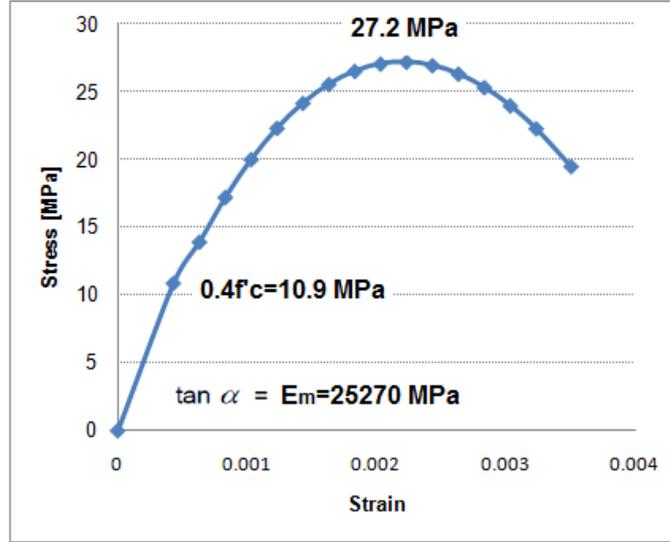
بيّنت الدراسات السابقة أن قيمة ϵ_{c1} في RAC تزداد مع زيادة نسبة الركام المعاد تدويره (Xiao, 2005; Gonzalez et al, 2009)، وبما أنه من أجل R100 كانت الزيادة 20% تم الافتراض في هذه الدراسة أن يتم زيادة ϵ_{c1} في حالة R50 بنسبة 10%.

وللتأكد من صحة هذه القيمة تم العودة إلى دراسة أجراها (Bhikshma & Kishore, 2010) تم فيها إيجاد ϵ_{c1} تجريبياً والجدول (1-7) يوضح النتائج التي توصلنا لها من أجل خرسانة بنسب من الركام المعاد تدويره تبدأ من 0% وحتى 100%. ويظهر من الجدول أنه من أجل خرسانة مع بركام معاد تدويره بنسبة 100% كانت الزيادة في ϵ_{c1} بنسبة 19.4% وهذا يؤكد صحة الافتراض لإيجاد منحنى R100، ومن أجل ركام معاد تدويره بنسبة 50% كانت الزيادة في ϵ_{c1} بنسبة 9% وبالتالي الافتراض مقبول.

الجدول (1-7) نتائج ϵ_{c1} وفق دراسة (Bhikshma & Kishore, 2010) لنسب مختلفة من RA

| Sl. No. | Mix designation | Stress (MPa) | Strain ($\epsilon \times 10^4$) | Increase |
|---------|-----------------|--------------|-----------------------------------|----------|
| 1. | RMA-0 | 19.20 | 21.65 | - |
| 2. | RMA-50 | 18.43 | 23.56 | %9 |
| 3. | RMA-75 | 17.48 | 24.47 | %13 |
| 4. | RMA-85 | 16.36 | 25.38 | %18 |
| 5. | RMA-100 | 15.81 | 25.86 | %19.4 |

وبالتالي أيضا من أجل R50 تم اعتماد المنحنيات والعلاقات التي تم شرحها في حالة الخرسانة المنتجة من ركام طبيعي والمأخوذة من الكود الأوربي (Eurocode2, 2004) لإيجاد مخطط الإجهاد - التشوه النسبي للخرسانة على الضغط الموضح في الشكل (7-8) مع الأخذ بعين الاعتبار زيادة التشوه النسبي ϵ_{c1} بمقدار 10% أي تصبح قيمته 0.0022. تم أخذ f_{cm} مساوي لـ 27.2 MPa و E_{cm} مساوي لـ 25270 MPa وذلك بحسب ما أعطت التجارب.



الشكل (7-8) منحنى إجهاد- تشوه الخاص بـ R50 (الدراسة الحالية).

ب- تصرف الخرسانة في حالة الشد الأحادي المحور

Concrete Uni-axial Tension behavior

يكون تصرف الخرسانة تحت تأثير الشد المحوري خطياً مرناً حتى الوصول إلى إجهاد الانهيار للخرسانة على الشد σ_{t0} (Failure Stress) الشكل (7-9) الذي يترافق مع ظهور أول شق، وبعد يتوالى ظهور الشقوق وتسلق المادة سلوكاً لا خطياً وتبدأ الإجهادات في هذه المرحلة بالإنخفاض مع استمرار ازدياد التشوهات حيث تسمى هذه المرحلة بـ (Strain Softening) وتمثل هذه المرحلة مرحلة ما بعد الانهيار وتسمى بمرحلة تصلب الشد (Tension Stiffening).

وكما في حالة الضغط عند إزالة الحمولة عن أي نقطة من المرحلة (Strain Softening) من منحنى الإجهاد- التشوه على الشد تتناقص قساوة المادة حيث يتم التعبير عن انخفاض القساوة بالمعامل d_t الذي يسمى معامل تخفيض القساوة على الشد (Uniaxial Tension Damage Variable) حيث يأخذ قيمة ابتداءً من الصفر للتعبير عن المادة غير المتشققة إلى الواحد عندما تفقد المادة كامل مقاومتها، حيث يعبر الخط المنقط نو الميل $E_0(1-d_t)$ في الشكل (7-9) عن حالة إزالة الحمولة حيث تسلك الخرسانة سلوكاً لئناً، و بالمقارنة مع الخط المنقط ذي الميل E_0 الذي يعبر عن سلوك المادة المرنة عند إزالة الحمولة حيث E_0 هو معامل المرونة الابتدائي (Initial modulus of elasticity) نلاحظ انخفاض ميل الخط المنقط إلى $E_0(1-d_t)$ بمقدار d_t وهذا ناتج عن انخفاض قساوة المادة عند إزالة الحمولة بسبب ظهور تشوهات الشد اللدنة المتبقية في المادة (Tensile Equivalent Plastic Strain) التي تعطي بالعلاقة:

$$\varepsilon_t^{pl} = \varepsilon_t^{ck} - \frac{d_t}{(1 - d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (7-9)$$

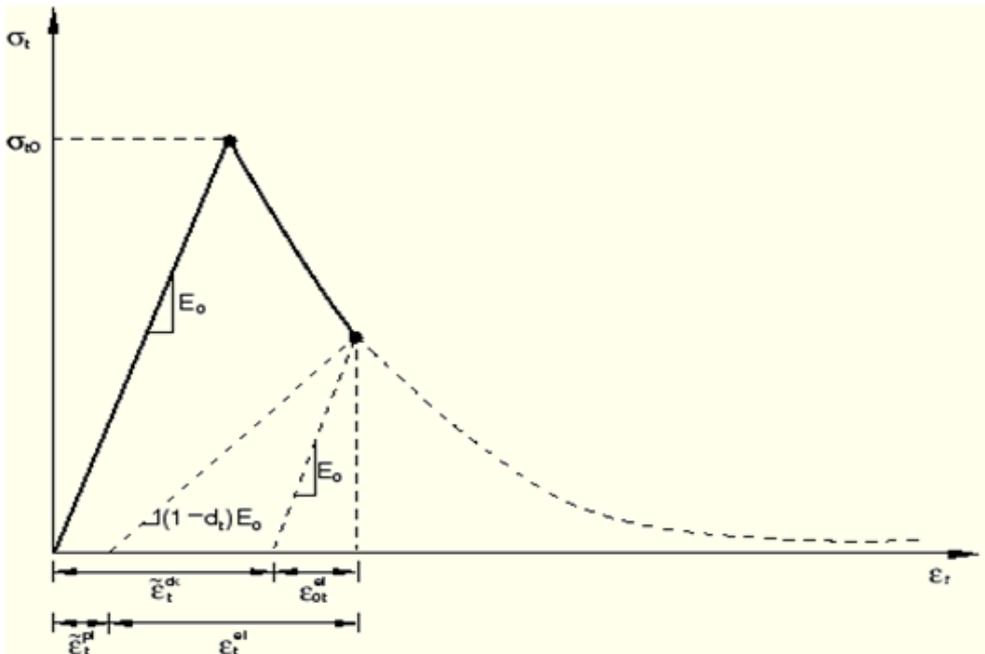
حيث ε_t^{ck} هو تشوه التشقق (Cracking Strain) وهو عبارة عن الفرق بين التشوه الكلي الحاصل عند نقطة معينة من منحنى الإجهاد - التشوه على الشد غير المحور والتشوه المرن عند هذه النقطة ε_{0t}^{el} (Elastic Strain) الذي ينتج من تقسيم إجهاد الشد الناتج عند النقطة المذكورة σ_t على معامل المرننة الابتدائي E_0

$$\varepsilon_t^{ck} = \varepsilon_t - \varepsilon_{0t}^{el} \quad (7-10)$$

$$\varepsilon_{0t}^{el} = \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (7-11)$$

ويعطى d_t بالعلاقة (Jankowiak and Lodygowski , 2005) :

$$d_t = \frac{\sigma_{to} - \sigma_t}{\sigma_{to}}$$



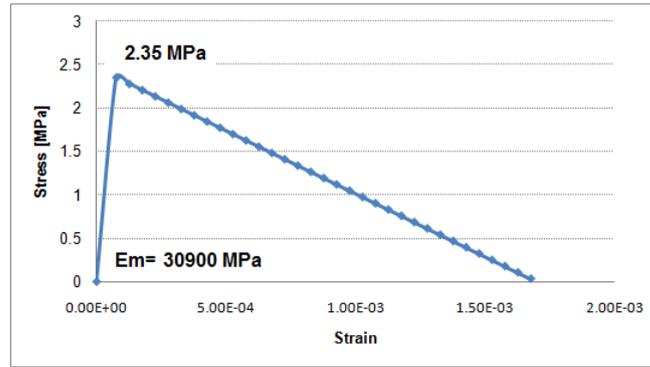
الشكل (97-) مخطط الإجهاد - التشوه النسبي للبيتون على الشد (ABAQUS Ver6.12 Documentation ,2012)

توضح الأشكال (7-10)، (7-11)، (7-12) الإجهاد – التشوه النسبي للخرسانة على الشد من أجل R0، R50، R100 على الترتيب والتي تم اعتمادها في هذه الدراسة التحليلية. حيث تم إيجاد هذه المخططات من خلال تبسيط مخطط الإجهاد – التشوه النسبي للخرسانة على الشد حسب (ABAQUS Ver6.12 Documentation, 2012) إلى منحني خطي يقسم إلى مرحلتين، المرحلة الخطية الأولى تزداد فيها المقاومة حتى تصل الخرسانة لمقاومتها العظمى على الشد f_{ctm} ، ويقابلها التشوه النسبي الابتدائي للخرسانة على الشد المرافق ϵ_{to} (Initial Tensile strain in the concrete) ويعطى بالعلاقة (Kmiecik & Kaminski, 2011):

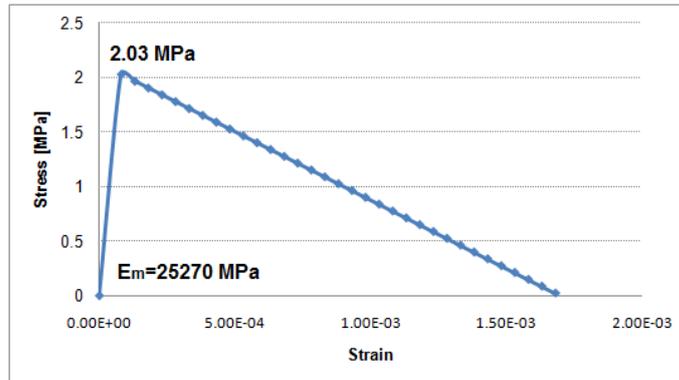
$$\epsilon_{to} = \frac{f_{ctm}}{E_0} \quad (7-13)$$

تبدأ المرحلة الثانية فيها المقاومة بالانخفاض بشكل خطي (linear softening) حتى انعدامها عند قيمة التشوه الحدي للخرسانة على الشد ϵ_{total} (Ultimate Tensile strain in the concrete) وبسبب وجود التسليح في الجوائز تم اعتبار أن الخرسانة تخرج عن العمل على الشد عند وصول فولاذ التسليح للسليلان، أي تم أخذ ϵ_{total} مساوٍ للتشوه النسبي عند الخضوع ϵ_y وحسب من العلاقة:

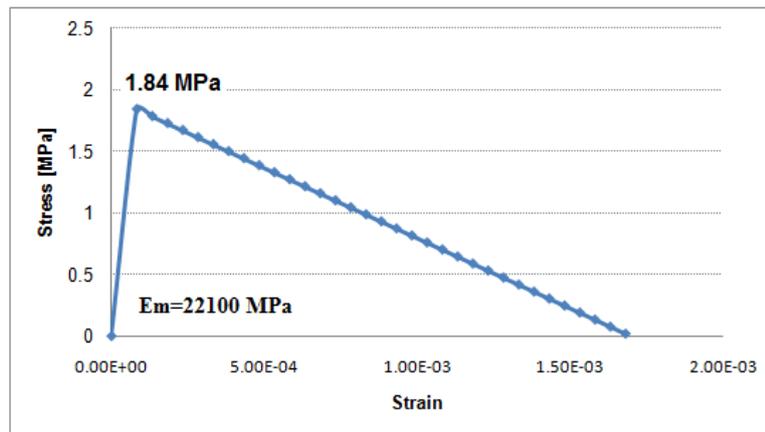
$$\epsilon_{total} = \epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \quad (7-14)$$



الشكل (107-) منحنى الإجهاد – التشوه النسبي للخرسانة على الشد من أجل R0 (الدراسة الحالية)



الشكل (117-) منحنى الإجهاد – التشوه النسبي للخرسانة على الشد من أجل R50 (الدراسة الحالية)

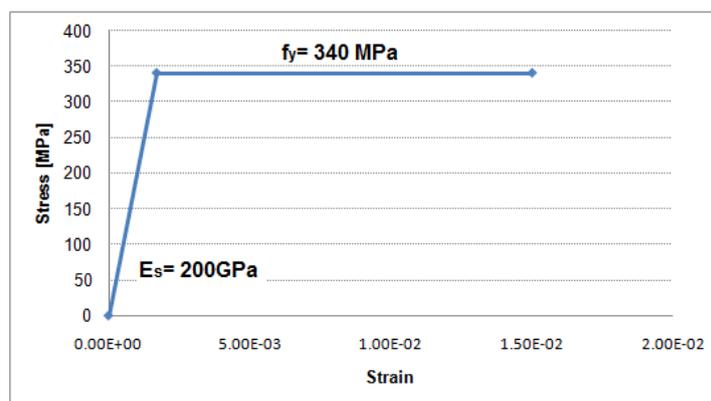


الشكل (127-) منحنى الإجهاد – التشوه النسبي للخرسانة على الشد من أجل R100 (الدراسة الحالية)

ج- توصيف فولاذ التسليح في النموذج العددي

Reinforcement Modeling in numerical model

تم اعتبار تصرف فولاذ التسليح المطاوع تصرفاً مرناً - كامل اللدونة (Elastic- perfectly Plastic) حتى الوصول إلى انهيار المادة. ويوضح الشكل (7-13) علاقة الإجهاد – التشوه النسبي لحديد التسليح الطولي المعتمدة في النموذج، حيث يبدأ سلوك الحديد مرناً خطياً حتى الوصول إلى إجهاد الخضوع f_y وبعدها تم فرض سلوك فولاذ التسليح لدينا مثالياً. وبالتالي تم تعريف التصرف اللدن للتسليح بإدخال معامل مرونة الفولاذ مساوية لـ $E_s = 200 \text{ GPa}$ ، وعامل بواسون $\nu = 0.3$ وكذلك إجهاد خضوع الفولاذ $f_y = 340 \text{ MPa}$.



الشكل (137-) مخطط الاجهاد – التشوه النسبي لحديد التسليح المعتمد في الدراسة الحالية

6-3-7 التماسك بين الخرسانة و فولاذ التسليح

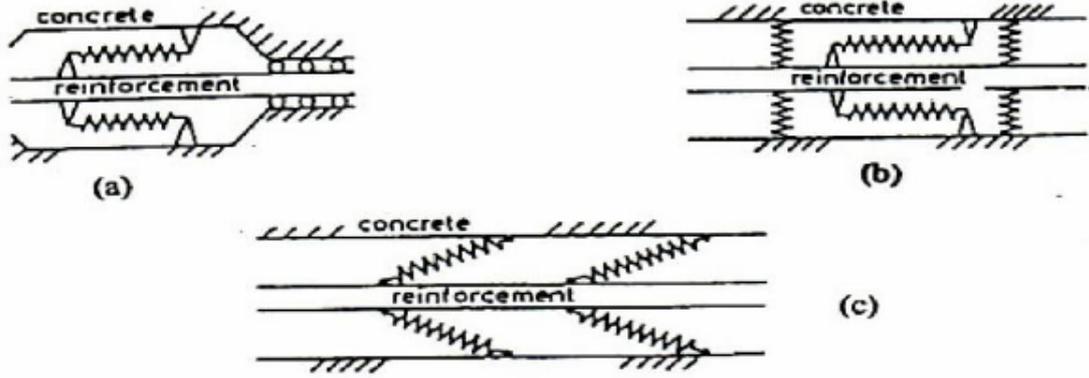
Bond – Slip Relationship between Concrete and Reinforcement

• التماسك بين الخرسانة و فولاذ التسليح الطولي

Bond – Slip Relationship between Concrete and longitude Reinforcement

تم أخذ تأثير التماسك-الانزلاق بين الخرسانة وفولاذ التسليح بعين الاعتبار كونها تعتبر من أكثر الأمور الهامة في التحليل، فبفضل هذه الظاهرة تعمل هاتين المادتين معا في مقاومة الأحمال، وخاصة عندما يحدث التشقق حيث يحصل انتقال في الإجهادات بين هاتين المادتين في المنطقة القريبة من الشق.

أعطت الأبحاث دراسات متعددة لتوصيف مكونات علاقة إجهاد التماسك – الانزلاق، كما استخدمت عدة طرق لتمثيل طبيعة هذه العلاقة في مجال التحليل باستخدام طريقة العناصر المحدودة ويعتبر استخدام النوابض أحد هذه الطرق. ويوضح الشكل (7-14) أنواع متعددة للنوابض المستخدمة لتمثيل ظاهرة التماسك.



الشكل (147-) أشكال مختلفة من النوابض المستخدمة لتمثيل ظاهرة التماسك (CEB-FIP, 2000)

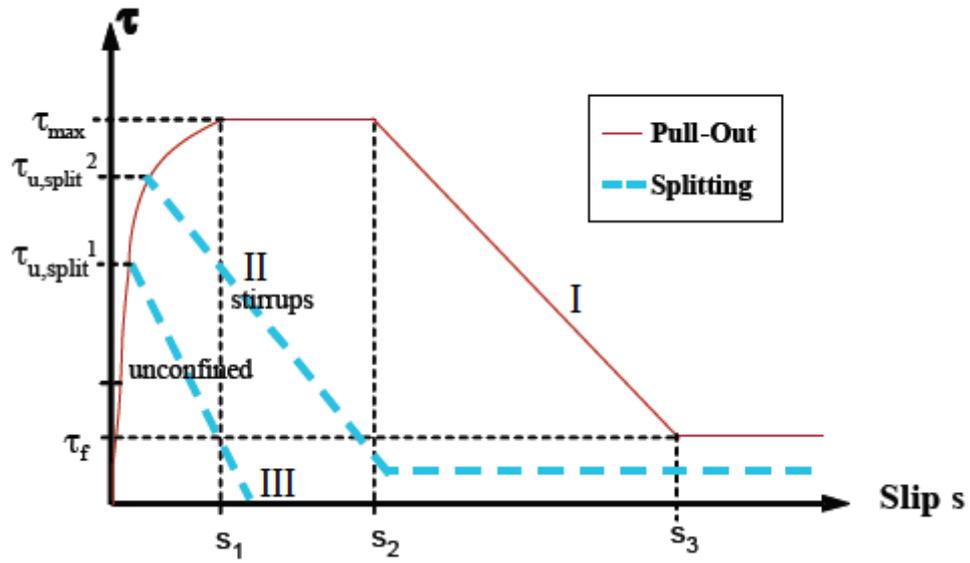
إن النابض الذي تم استخدامه كعنصر اتصال بين عقدتين الأولى من الخرسانة والثانية من فولاذ التسليح هو النابض من نوع (Spring 2) ويوضحه الشكل (7-15)، ويتميز هذا النابض بإمكانية نمذجة التصرف بين القوة والانتقال أو القوة والدوران، وله درجة حرية واحدة وتم أخذها في النموذج حرية انتقال في الاتجاه الموازي للتسليح.



الشكل (157-) شكل النابض المستخدم في النمذجة من نوع (Spring 2) (ABAQUS Ver6.12 Documentation, 2012)

ولتمثيل علاقة إجهاد التماسك – الانزلاق (Bond-Slip Relationship) تم اعتماد نموذج التماسك بين الخرسانة وفولاذ التسليح والمأخوذ من (CEB-FIP, 2010) المنحني I الموضح بالشكل (7-16) والذي هو حالة انسحاب فولاذ التسليح (Pull out)، حيث يمثل المحور الأفقي الانزلاق في قضبان فولاذ التسليح بينما يمثل المحور الشاقولي إجهاد التماسك بين الخرسانة والفولاذ.

حيث تبدأ إجهادات التماسك وانزلاق قضبان التسليح بالتزايد بشكل لا خطي حتى الوصول إلى قيمة إجهاد التماسك الأعظمي τ_{max} وتكون قيمة الانزلاق عنده مساوية لـ S_1 ، ثم تليها مرحلة تثبت فيها قيمة إجهاد التماسك الأعظمي مع استمرار تزايد قيمة الانزلاق حتى الوصول إلى قيمة انزلاق مساوية لـ S_2 ، بعدها تبدأ إجهادات التماسك بالانخفاض عن القيمة الأعظمية مع ازدياد الانزلاق حتى وصوله إلى قيمة S_3 عند قيمة إجهاد تماسك أصغري τ_f ، ثم تثبت بعدها قيمة إجهاد التماسك الأصغري τ_f مع تزايد في قيمة الانزلاق.



الشكل (167-) منحنى إجهاد التماسك - انزلاق بين الخرسانة وفولاذ التسليح (CEB-FIP, 2010)

ولإيجاد منحنى إجهاد التماسك - الانزلاق يقدم (CEB-FIP, 2010) العلاقات التالية:

$$\begin{aligned}
 \tau_0 &= \tau_{max} (s/s_1)^\alpha & \text{for } 0 \leq s \leq s_1 \\
 \tau_0 &= \tau_{max} & \text{for } s_1 \leq s \leq s_2 \\
 \tau_0 &= \tau_{max} (\tau_{max} - \tau_f) (s-s_2)/(s_3-s_2) & \text{for } s_2 \leq s \leq s_3 \\
 \tau_0 &= \tau_f & \text{for } s_3 < s
 \end{aligned}
 \tag{7-15}$$

حيث :

τ_0 : قيمة إجهاد التماسك عند النقطة المدروسة (Bond stress).

τ_{max} : قيمة إجهاد التماسك الأعظمي (Maximum bond stress)

τ_f : إجهاد التماسك الأصغري (Bond stress at Failure)

S : قيمة انزلاق قضبان التسليح عند النقطة المدروسة (Slip)

S_1 : قيمة الانزلاق عند وصول إجهاد التماسك بين الخرسانة وحديد التسليح إلى القيمة الأعظمية τ_{max}

S_2 : قيمة انزلاق قضبان التسليح عند بدء انخفاض قيمة إجهاد التماسك عن القيمة الأعظمية τ_{max}

S_3 : قيمة انزلاق قضبان التسليح عند وصول إجهاد التماسك بين الخرسانة وحديد التسليح إلى القيمة الأصغرية τ_f

وتؤخذ مساوية للمسافات بين نتوءات التسليح c (Clear distance between ribs).

α : ثابت يأخذ القيمة 0.4.

يتم حساب قيم المتغيرات السابقة والموضحة آنفاً باعتماد الجدول (7-2) ويتم تمييز حالتين بحسب شروط

التماسك ومقاومة الخرسانة، الحالة الأولى الخرسانة ذات مقاومة عالية وتؤمن شروط تماسك جيدة (Good bond)

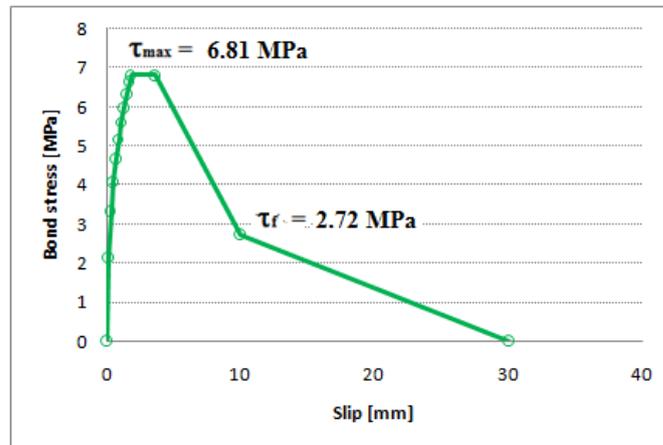
(condition)، والحالة الثانية الخرسانة ذا مقاومة عادية وتؤمن شروط تماسك أخرى (All other bond condition)

الجدول (2-7) قيم بارامترات منحني إجهاد التماسك- انزلاق بين الخرسانة وفولاذ التسليح (CEB-FIP, 2010)

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------|-------------------------------|----------------------|---|---|---|---|
| | Pull-Out (PO) | | Splitting (SP) | | | |
| | $\epsilon_s < \epsilon_{s,y}$ | | $\epsilon_s < \epsilon_{s,y}$ | | | |
| | Good bond cond. | All other bond cond. | Good bond cond. | | All other bond cond. | |
| | | | unconfined | stirrups | unconfined | stirrups |
| τ_{max} | $2.5\sqrt{f_{ck}}$ | $1.25\sqrt{f_{ck}}$ | $7.0 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{20}\right)^{0.25}$ | $8.0 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{20}\right)^{0.25}$ | $5.0 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{20}\right)^{0.25}$ | $5.5 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{20}\right)^{0.25}$ |
| s_1 | 1.0mm | 1.8mm | $s(\tau_{max})$ | $s(\tau_{max})$ | $s(\tau_{max})$ | $s(\tau_{max})$ |
| s_2 | 2.0mm | 3.6mm | s_1 | s_1 | s_1 | s_1 |
| s_3 | $c_{clear}^{1)}$ | $c_{clear}^{1)}$ | $1.2s_1$ | $0.5c_{clear}^{1)}$ | $1.2s_1$ | $0.5c_{clear}^{1)}$ |
| α | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| τ_f | $0.40\tau_{max}$ | $0.40\tau_{max}$ | 0 | $0.4\tau_{max}$ | 0 | $0.4\tau_{max}$ |

¹⁾ c_{clear} is the clear distance between ribs

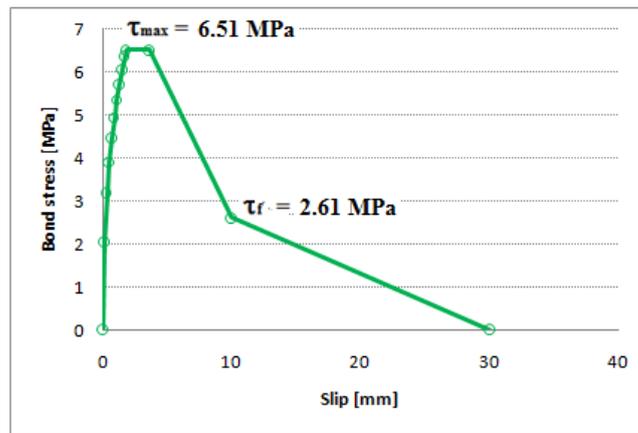
تم في الدراسة الحالية اعتماد على المنحني I مع حالة (All other bond cond) في الجدول (2-7) باعتبار أن الخرسانة عادية المقاومة حيث المقاومة المميزة الإسطوانية للخرسانة لم تتجاوز 40MPa. تم باستخدام العلاقات (7-15) الوصول إلى منحني إجهاد التماسك - انزلاق بين الخرسانة وفولاذ التسليح المستخدم في النموذج الخاص بـ R0 (الشكل 7-17) حيث في النهاية تم إيصال إجهاد التماسك إلى الصفر عند انتقال افتراضي مقداره ثلاث أضعاف الانزلاق النسبي S_3 أي 30mm واعتباره حد انهيار التماسك بين الخرسانة وفولاذ التسليح بشكل كامل الأمر الذي يضمن خروج العنصر SPRING2 عن العمل.



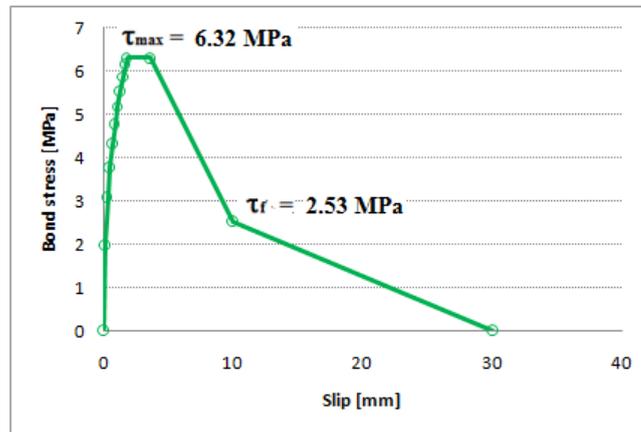
الشكل (177-) منحني إجهاد التماسك - انزلاق بين الخرسانة وفولاذ التسليح المعتمد في الدراسة الحالية من أجل R0

أوضحت الدراسات بحسب ما تم ذكره في الفصل الثالث أن التماسك لا يتأثر كثيراً عندما يستخدم الركام المعاد تدويره الخشن حتى نسبة 100% كبديل عن الركام الخشن الطبيعي، حيث بيّنت نتائج الدراسات السابقة أن الاختلاف بين إجهاد التماسك الأعظمي لـ NAC و RAC لم يتجاوز 10% (Abukersh, 2009; Kim et al. 2012; Malešev et al, 2010).

وبناءً عليه تم إيجاد منحنى إجهاد التماسك- الانزلاق الخاص بـ R50 و R100 باعتماد (CEB-FIP,2010) وفق الطريقة آنفة الذكر نفسها بأخذ بعين الاعتبار المقاومة على الضغط الخاصة بكل منهما والأشكال (7-18) و (7-19) يظهران المنحنيات المعتمدة في النموذج من أجل R50 و R100 على الترتيب.



الشكل (187-) منحنى إجهاد التماسك - انزلاق بين الخرسانة وفولاذ التسليح المعتمد في الدراسة الحالية من أجل R50



الشكل (197-) منحنى إجهاد التماسك - انزلاق بين الخرسانة وفولاذ التسليح المعتمد في الدراسة الحالية من أجل R100

لا بد من التنويه بأنه يجب في برنامج ABAQUS إدخال علاقة قوة التماسك - الانزلاق بدلاً من إجهاد تماسك- الانزلاق للتوافق مدخلات العنصر SPRING2، وللقيام بذلك تم احتساب القوة من خلال ضرب إجهاد التماسك بسطح التماس بين القضبان والخرسانة والذي هو عبارة عن محيط قضيب التسليح مضروباً بالطول الذي يغطيه النابض الواحد بين فولاذ التسليح والخرسانة.

• التماسك بين الخرسانة وفولاذ التسليح العرضي (الأساور)

Bond – Slip Relationship between Concrete and Stirrups

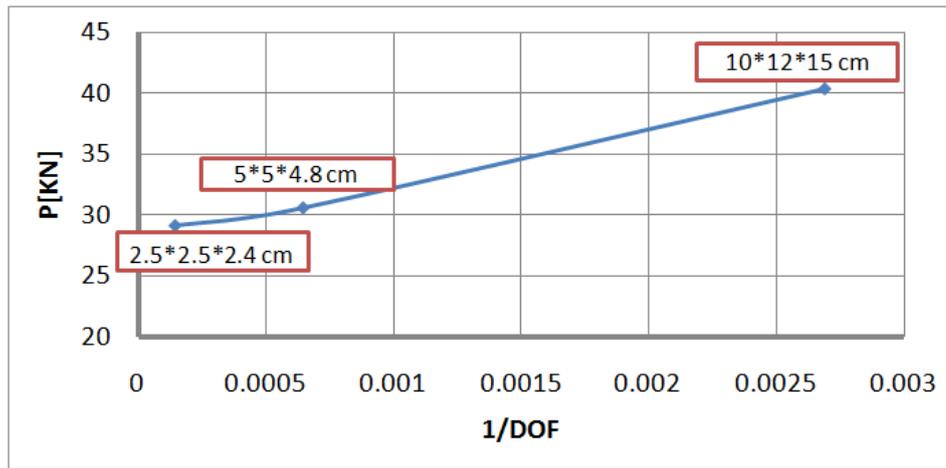
تم في هذه الدراسة اعتبار التماسك بين التسليح العرضي في الجوائز الخرسانية المسلحة كتماسك مطلق وتام (Perfect bond) وبذلك تم إهمال الانتقال النسبي بين المادتين، حيث أن هذا الافتراض لا يؤثر على دقة النتائج كون الانهيار في الجوائز على الانعطاف.

4.7 دراسة أثر تقارب الشبكة

Mesh Convergence

بما أن طريقة العناصر المحدودة هي طريقة عددية، وبالتالي لا بد من تحديد الأبعاد المناسبة لتقسيمات العناصر المحدودة المستخدمة من أجل الوصول إلى التقسيم الأمثل للشبكة التي تكون أكثر اقتصادية في زمن الحل مع دقة في النتائج. تمت دراسة أثر تقارب الشبكة (Mesh Convergence) للنموذج المدروس كما هو واضح في الشكل 21 ، حيث يمثل المحور الأفقي مقلوب عدد درجات الحرية (Degree of Freedom, DOF) في النموذج، بينما يمثل المحور الشاقولي تغير قيمة حمولة الانهيار P_{II} للجوائز الخرساني المسلح الموضح في الشكل (5-28) وذلك من أجل تقسيمات شبكة (Mesh) مختلفة.

يلاحظ من الشكل (7-20) حدوث تقارب في النتائج بين استخدام العنصر الفراغي C3D8 بأبعاد (50x50x48mm)، حيث قوة الانهيار مساوية 30.6 KN وعند استخدام نفس العنصر لكن بأبعاد (25x25x24mm) حيث كانت قوة الانهيار 29.2 KN، بينما أدى استخدام عنصر بأبعاد (100x120x150) إلى حمولة انهيار 40.4 KN، وبالتالي اعتماد العنصر الفراغي بأبعاد (50x50x50mm) كافٍ للحصول على حل دقيق مع اقتصادية في زمن التحليل.

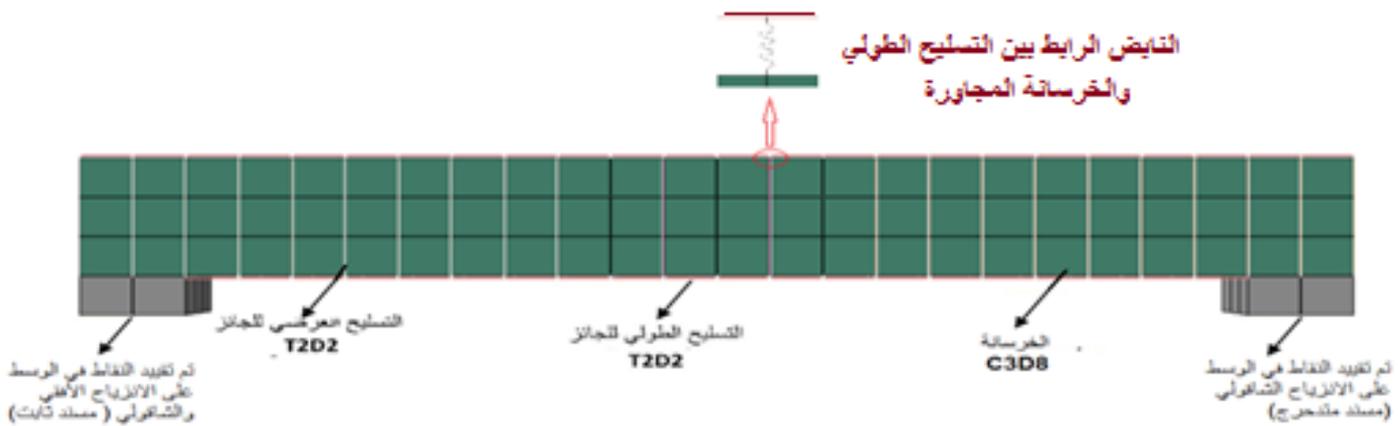


الشكل (207-) دراسة أثر تقارب تقسيم الشبكة للنموذج المدروس

5.7 شكل النموذج المدروس في برنامج ABAQUS

The Studied Model in ABAQUS Program

يبين الشكل (7-21) النموذج النهائي المدروس وفق برنامج ABAQUS ver6.12، حيث يظهر في الشكل العناصر المعتمدة لتمثيل الجوائز الخرساني، التسليح الطولي والعرضي وشروط الاستناد وأيضا طريقة تمثيل التماسك بين الفولاذ والخرسانة.



الشكل (217)- النموذج المعتمد في الدراسة باستخدام برنامج (ABAQUS ver6.12)

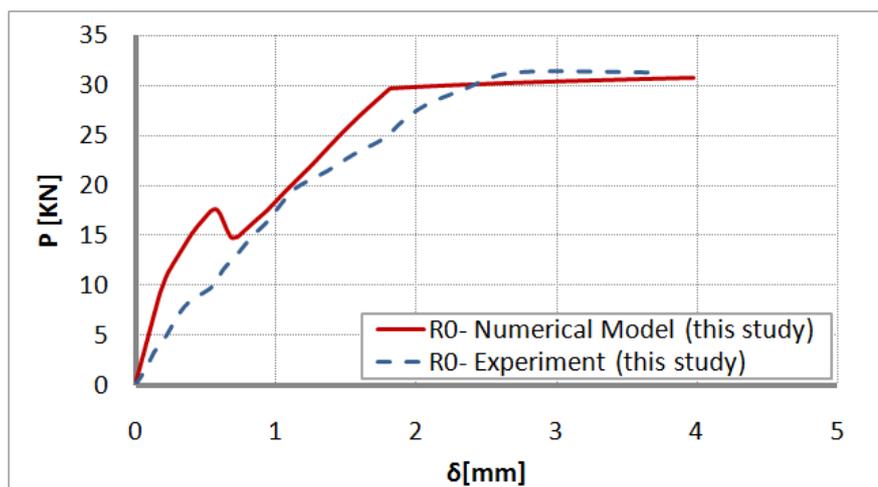
6.7 التحقق من النموذج:

Verification of Model

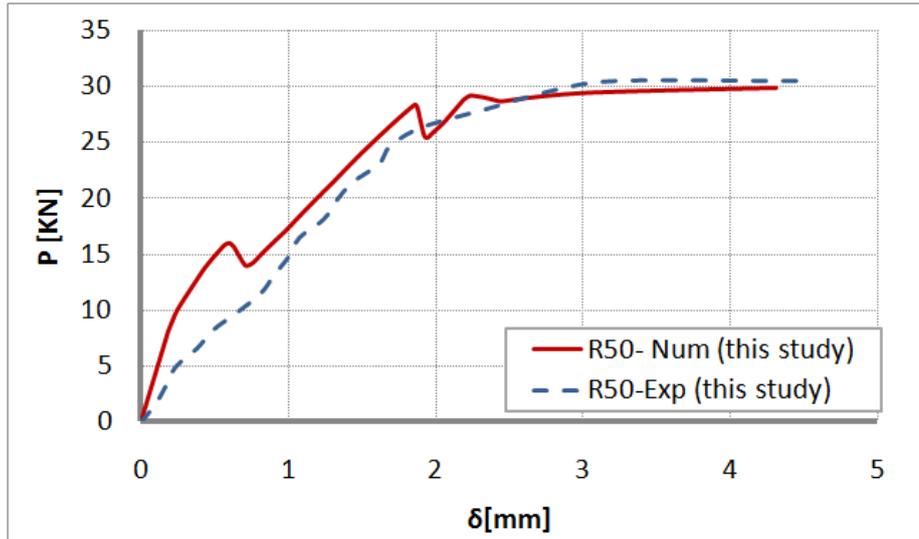
1-6-7 مقارنة بين النتائج التحليلية والتجريبية

Comparison between Numerical and Experimental Study

تمت مقارنة علاقة القوة- الانتقال في منتصف مجاز الجانز الخرساني المسلح الناتجة من الدراسة التحليلية باستخدام ABAQUS ver6.12 مع تلك التي نتجت عن الدراسة التجريبية والتي تم ذكرها في الفقرة 5-5-2 وذلك لـ R0، R50، R100 وتوضيحها الأشكال (22-7)، (23-7)، (24-7) على الترتيب. يظهر في جميع الأشكال التطابق الكبير في حمولة الانهيار والمساوية تقريبا (30 KN) تحليليا وتجريبياً. وهذا يدل على صحة النموذج الرياضي المعتمد في تحديد الحمل الأعظمي الذي يتحمله الجانز الخرساني المسلح.

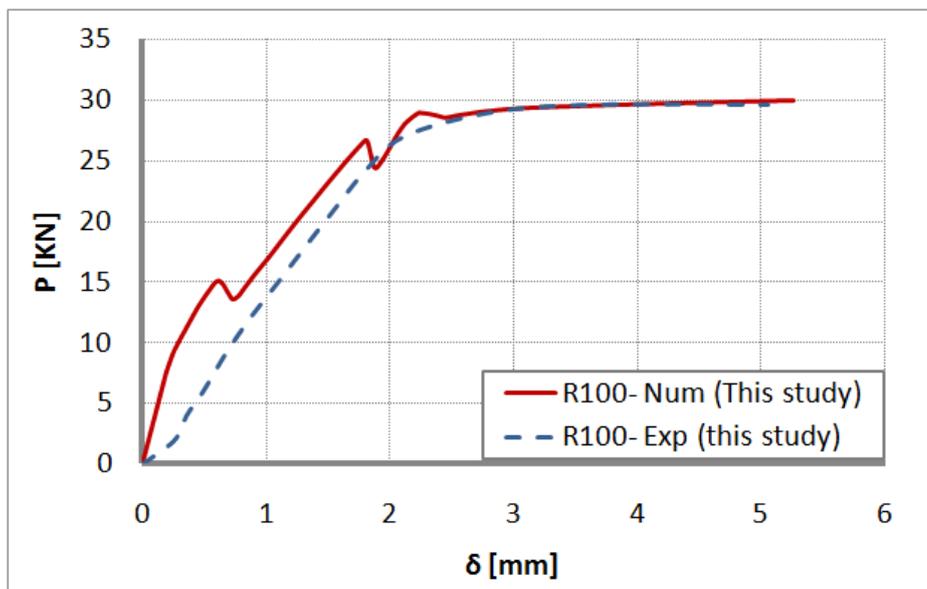


الشكل (227)- مقارنة علاقة القوة- الانتقال في منتصف مجاز الجانز الخرساني المسلح R0 الناتجة عن الدراسة التجريبية والتحليلية



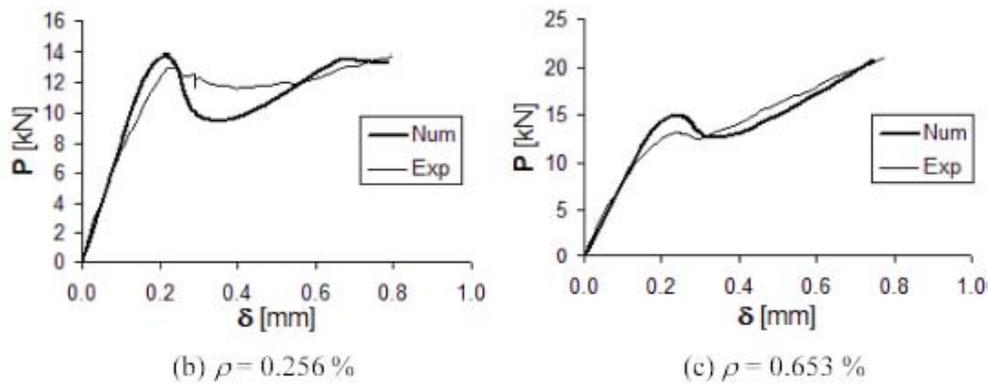
الشكل (237-) مقارنة علاقة القوة- الانتقال في منتصف مجاز الجانز الخرساني المسلح R50 الناتجة عن الدراسة التجريبية والتحليلية

تظهر الأشكال الثلاثة السابقة (22-7)، (23-7)، (24-7) أن النموذج التحليلي أبدى قساوة أعلى من النموذج التجريبي في المرحلة قبل تشكل المفصل اللدن (ثبات الحمل مع زيادة في الانتقال)، ويعود ذلك إلى أن الدراسة التحليلية استخدمت منحنيات نموذجية لتصرف المواد من الكودات وهي مختلفة بعض الشيء عن التصرف الحقيقي في التجربة كون مادة الخرسانة تعتبر مادة غير متجانسة ولا يمكن التنبؤ بشكل دقيق بسلوكها، إضافة إلى أنه لا يمكن التحكم بشروط التجربة لتكون مطابقة تماما للدراسة التحليلية. كما التحليل لا يأخذ التشققات الميكروية (Micro crack) في الخرسانة والسيلان وغيرها من الأمور التي تحدث أثناء التجربة (Ibrahim and Salman, 2009).



الشكل (247-) مقارنة علاقة القوة- الانتقال في منتصف مجاز الجانز الخرساني R100 المسلح الناتجة عن الدراسة التجريبية والتحليلية

أيضاً ظهر في الخط الممثل لعلاقة قوة- انتقال وفق النموذج الرياضي هبوط وصعود في قيمة القوة التي يتحملها الجائز، وهذه ظاهرة تم رصدها في سلوك الجوائز الخرسانية المسلحة بتسليح قليل نسبياً (Cadamuro et al, 2010) كما في الشكل (7-25)، وتم تفسير هذه الظاهرة بأن كمية التسليح غير قادرة على تأمين استقرار مباشرة بعد اتساع الشق، حيث عند بدء حدوث التشقق واتساعه في الخرسانة يحدث عدم استقرار في توزيع الإجهادات وبالتالي تنخفض القوة التي يتحملها الجائز. بعدها يعمل التسليح الموضوع في الجائز على إعادة الاستقرار ونقل القوى وبالتالي زيادة القوة التي يتحملها الجائز حتى يصل إلى مرحلة السيلان التي ينهار عندها الجائز.



الشكل (257-) شكل علاقة قوة انتقال من أجل نسبتي تسليح 0.256% و 0.653% بحسب (Cadamuro et al, 2010)

إن نسبة التسليح الموضوع في الجوائز هي $\mu_s = \frac{(2*8^2*\pi)/4}{120*150} = 0.559\%$ تقع في المجال الذي تم

رصد الظاهرة من أجله عند (Cadamuro et al, 2010) وبالتالي فإن ما تم لحظه في المنحني يفسر ببدء حدوث التشقق وللتأكد من ذلك تم العودة إلى مخططات التشوهات النسبية الرئيسية المقابلة للنقاط التي حدثت عندها هذا الهبوط. وتبين أن هذا الانخفاض قد صاحب فعلاً عملية التشقق في الخرسانة وهذا ما سيتم عرضه بالتفصيل في الفقرة 7-7 التالية.

بحسب الدراسة التحليلية فإن الجائز R0 قد انهيار على الشد حيث خضع الفولاذ ورافق ذلك ظهور شقين تحت الحملتين المركزيتين امتدا على كامل ارتفاع الجائز (الشكل 7-22)، في حين أن الجائزين R50 و R100 قد حصل فيهما شق إضافي في منتصف الجائز وذلك قبل خضوع الفولاذ مباشرة وهذا ما يفسر حصول هبوط ثانٍ الموضح في المنحنيات الناتجة عن الدراسة التحليلية لهما الشكلين (7-23)، (7-24).

إن ظهور شق إضافي في R50 و R100 سببه أن مقاومة الخرسانة فيهما على الشد أخفض من R0 وبالتالي فإن الإجهادات في المقطع الموافق لمنتصف الجائز قد وصلت لتحمل الخرسانة على الشد الأمر الذي سبب نشوء شق جديد وامتداده واتساعه قبل انهيار الجائز. ساعد في ذلك أيضاً إمكانية التشوه الأكبر للمنطقة المضغوطة في أعلى المقطع.

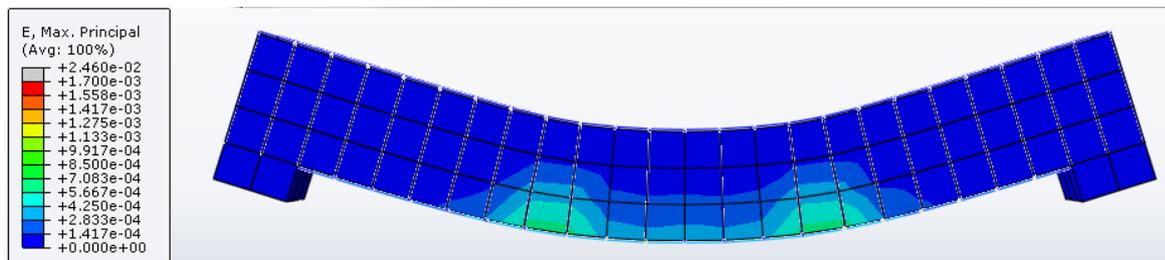
ولتوضيح ما سبق بشكل أفضل تم إدراج أشكال توضح مخططات التشوهات النسبية الرئيسية الحاصلة عند النقاط الأساسية لمنحنيات قوة - انتقال وذلك من أجل الجوائز الثلاثة والتي سيتم شرحها تباعاً.

2-6-7 التشوهات النسبية الرئيسية للجوائز المدروسة Principal Strain in Studied Beams

• الجائز الخرساني المسلح R0

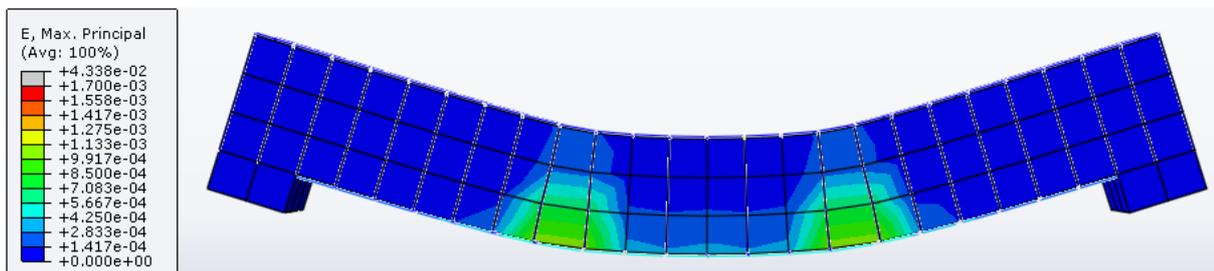
The Reinforced Concrete Beam R0

حصل عند انتقال مقداره $\delta=0.61$ mm تناقص في مقدار القوة التي يتحملها الجائز R0، وبالعودة إلى برنامج ABAQUS يمكن أن نحصل على التشوهات النسبية الرئيسية المقابلة لهذا الانتقال والمبينة في الشكل (7-26)، يظهر من هذا الشكل أن قيمة التشوهات النسبية في الليف المشدود أسفل نقاط التحميل قد بلغت 5.667×10^{-4} وبالعودة إلى منحنى إجهاد تشوه على الشد الخاص بـ R0 شكل (7-10) فإن الخرسانة عند هذا التشوه النسبي تكون قد تجاوزت تحملها على الشد وأصبح الشق في طور الاتساع وبالتالي رافق ذلك حالة عدم الاستقرار في نقل وتوزيع الإجهادات وسبب ذلك مقدار نسبة التسليح المستخدمة كما أوضحنا سابقاً.



الشكل (267-) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=0.61$ mm في R0

تستمر حالة عدم الاستقرار في الجائز حتى يصبح مقدار الانتقال الحاصل في وسط المجاز $\delta=0.69$ mm، وتصبح قيمة التشوهات النسبية الرئيسية مساوية لـ 1.133×10^{-3} (الشكل 7-27) عند هذه المرحلة يبدأ التسليح بالعمل ونقل الحمولة من جديد إلى المناطق غير المتشقة من الخرسانة وبالتالي تعود حالة الاستقرار للجائز وتعود الحمولة بالارتفاع.

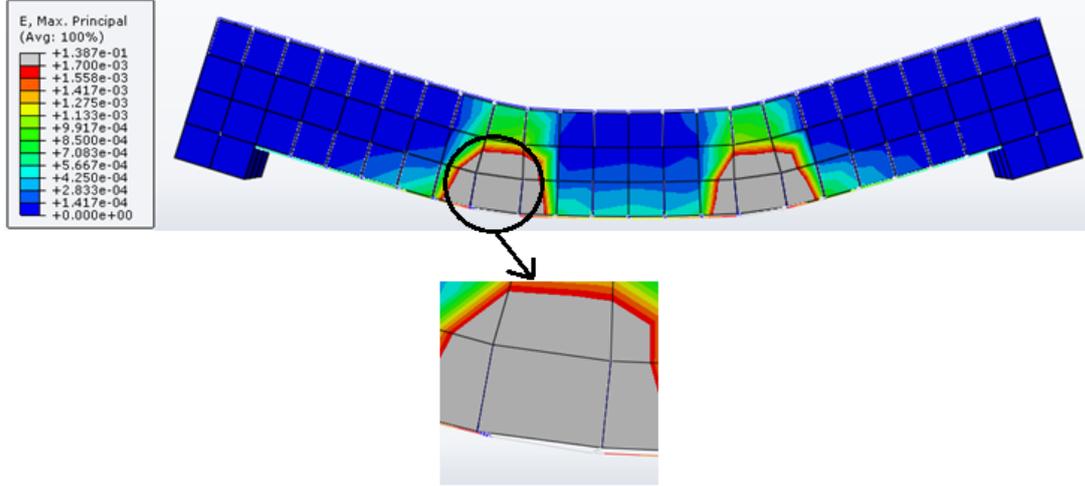


الشكل (277-) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=0.69$ mm في R0

يستمر ارتفاع القوة مع ازدياد الانتقال حتى الوصول إلى انتقال مقداره $\delta=1.78$ mm مع حمولة موافقة 29.7KN، يؤدي ازدياد قيمة القوة إلى ارتفاع قيمة التشوهات النسبية في الخرسانة والتسليح، حيث يتضح من الشكل

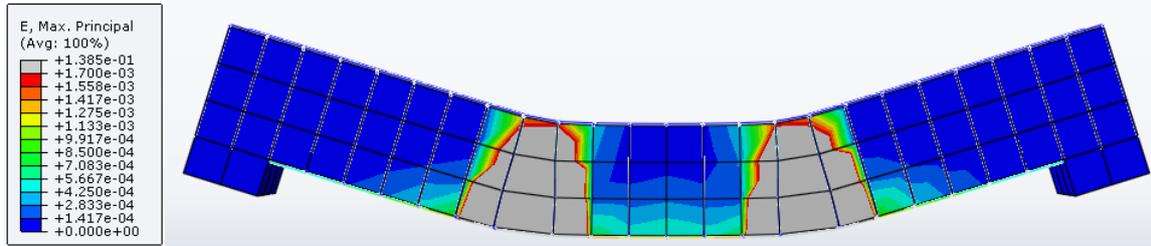
(28-7) أن قيمة التشوهات النسبية الرئيسية في التسليح قد تجاوزت قيمتها عند هذه الانتقال التشوه النسبي المقابل

$$\text{لخضوع الفولاذ وهو } \varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = 0.0017 \text{ وهذا ما يفسر ثبات الحمل تقريبا بعد هذه النقطة.}$$



الشكل (287-) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=1.78 \text{ mm}$ في R0 وبدء سيلان فولاذ التسليح

يبدأ تشكّل المفصل اللدن مع سيلان حديد التسليح ويحصل الانهيار في الجائز عندما تتسع الشقوق على كامل المقطع مع حمولة مقدارها 30.7 KN ويكون الانتقال الموافق لها $\delta=3.8\text{mm}$ (الشكل 29-7).



الشكل (297-) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=3.8 \text{ mm}$ في R0 وحدوث الانهيار

يشبه شكل الانهيار الذي أعطته الدراسة التحليلية شكل الانهيار الحاصل في التجربة إلى حد كبير، حيث يوضح الشكل (30-7) ظهور شقين رئيسيين تحت نقاط التحميل تقريبا واتساعهما عند الانهيار.

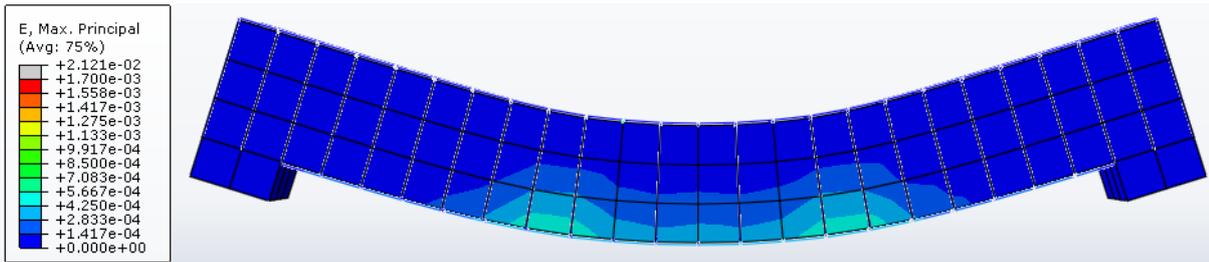


الشكل (307-) شكل الانهيار الحاصل في التجربة من أجل R0

• الجانز الخرساني المسلح R50:

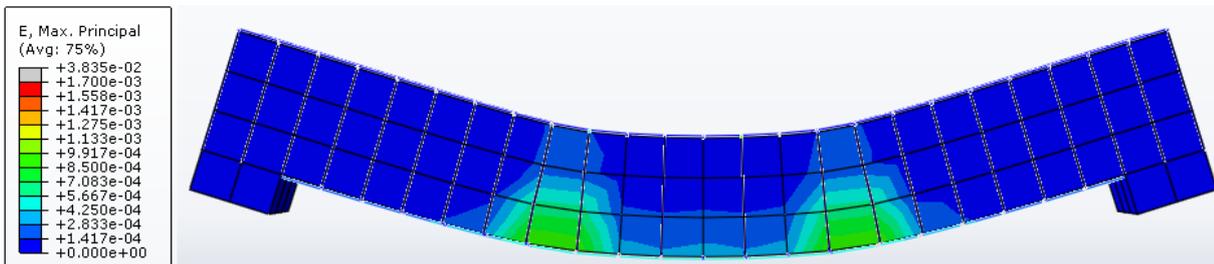
The Reinforced Concrete Beam R50

يوافق الهبوط الأول في منحنى قوة – انتقال الخاص بـ R50 انتقال مقداره $\delta=0.6\text{mm}$ كما يوضح الشكل (7-7). وبالعودة إلى مخطط التشوهات النسبية الرئيسية في برنامج ABAQUS الشكل (7-31) فإن التشوه المقابل في الليف السفلي المشدود تجاوز 4.25×10^{-4} وبحسب منحنى إجهاد تشوه للخرسانة على الشد شكل (7-11) فإن الخرسانة تكون في طور التشقق، وبالتالي الافتراض بأن الهبوط الحاصل عند هذا الانتقال سببه تشكل الشقوق في الخرسانة والدخول في حالة عدم استقرار نتيجة كمية التسليح المستخدمة صحيح.

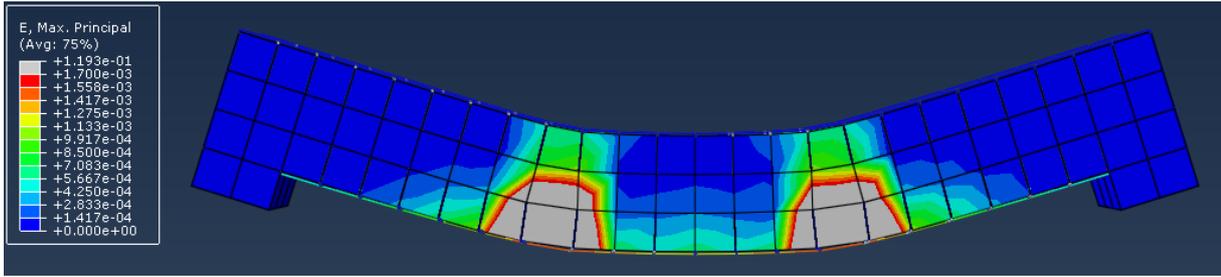


الشكل (317-) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=0.6\text{ mm}$ في R50

يمكن التسليح الموضوع من إعادة حالة الاستقرار عند انتقال مقداره $\delta=0.72\text{mm}$ ويكون التشوه المحوري الرئيسي في الليف السفلي حينها قد بلغ 9.97×10^{-4} كما هو مبين بالشكل (7-32)، وبعد هذه النقطة يصعد منحنى قوة- انتقال من جديد ولكن مع ازدياد القوة تتسع الشقوق وتزداد قيمة التشوهات النسبية الرئيسية في الليف السفلي وتصل في قيمتها في منتصف المجاز عند انتقال $\delta=1.86\text{mm}$ إلى 4.25×10^{-4} والتي يوضحها الشكل (7-33)، أي أن حالة عدم استقرار جديدة تحدث في الجانز وهذا ما يفسر الهبوط الثاني عند هذا الانتقال في منحنى قوة – انتقال الشكل (7-23).

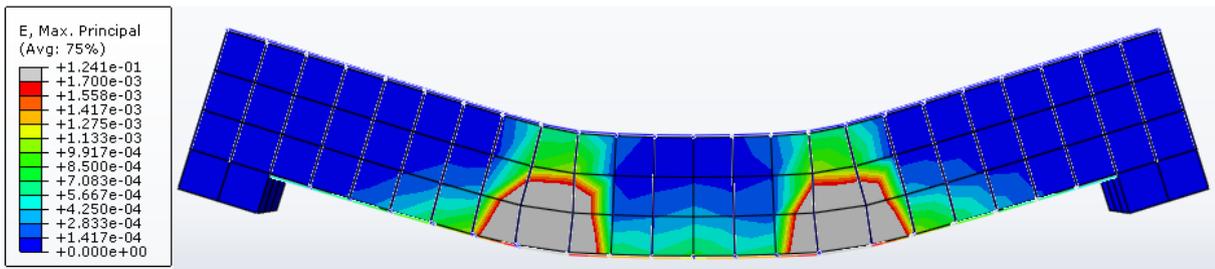


الشكل (327-) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=0.72\text{ mm}$ في R50



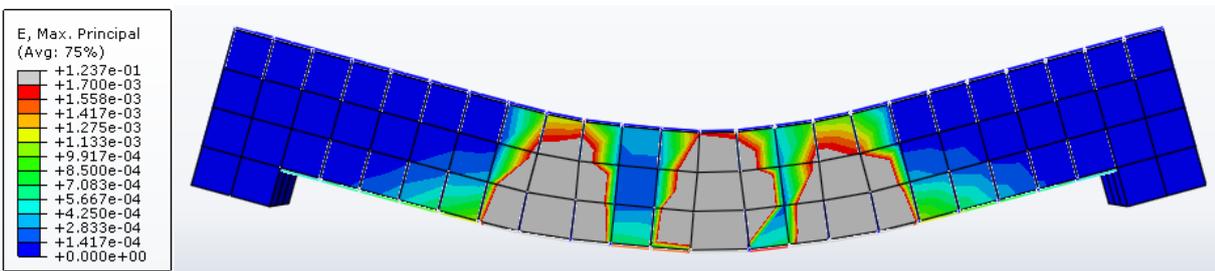
الشكل (337-) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=1.86 \text{ mm}$ في R50

لا يلبث أن يعمل التسليح على إعادة الاستقرار من جديد ويعود المقطع ليعمل ككل وتزداد القوة حتى الوصول إلى قيمة 28.01 KN مع انتقال $\delta=2.17 \text{ mm}$ عندها يتجاوز التشوه النسبي في الفولاذ قيمة الـ $\epsilon_y = 0.0017$ كما هو موضح في الشكل (34-7) ويدخل التسليح في مرحلة السيلائن وهذا ما يفسر ثبات القوة بعد هذا الانتقال في منحنى قوة – انتقال (الشكل 7-23).



الشكل (347-) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=2.17 \text{ mm}$ في R50 وبدء سيلائن فولاذ التسليح

تستمر الشقوق المتشكلة بالامتداد والاتساع بعد سيلائن التسليح حتى ينهار الجانز بعد تشكل المفصل اللدن عند قوة 30.1 KN وانتقال $\delta=4.3 \text{ mm}$ (الشكل 7-35).



الشكل (357-) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=4.3 \text{ mm}$ في R50 وحدث الانهيار

شابه الانهيار الذي تم الحصول عليه في التجربة تقريبا الانهيار الذي تم توضيحه تحليليا، حيث انهيار الجانز في التجربة على توسع الشق المتشكل في المنتصف ورافقه شقوق أخرى على جانبيه (الشكل 7-36).

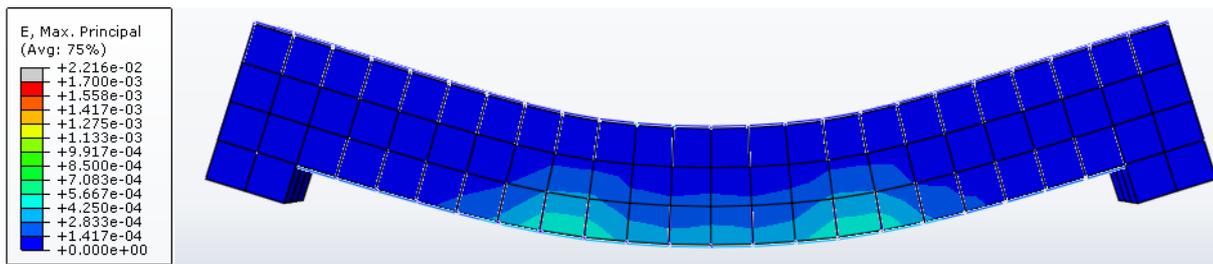


الشكل (367-) تشقق الجائز R50 وانهيائه تجريبيا

• الجائز الخرسانة المسلح R100:

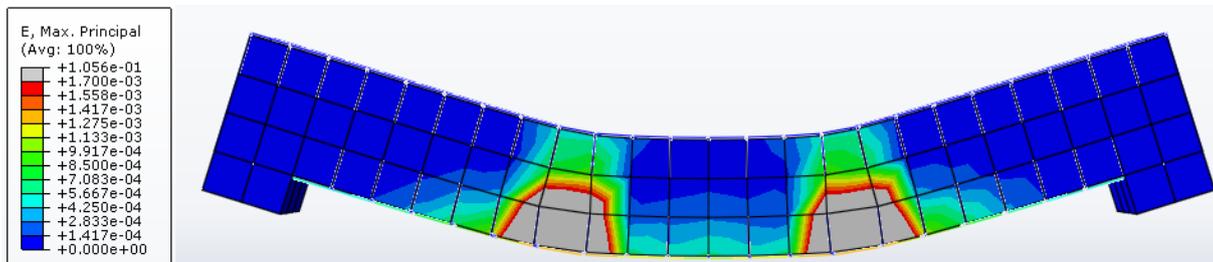
The Reinforced Concrete Beam R100

إن ما تم لحظه من أجل الجائز R50 تكرر في الجائز R100، حيث حصل انخفاض في القوة عند انتقال $\delta=0.62\text{mm}$ وعندها يكون التشوه النسبي الرئيسي تجاوز 4.25×10^{-4} كما هو موضح في الشكل (7-37)، وبحسب منحنى إجهاد تشوه للخرسانة على الشد في الشكل (7-23) فإن الخرسانة تكون في طور التشقق.



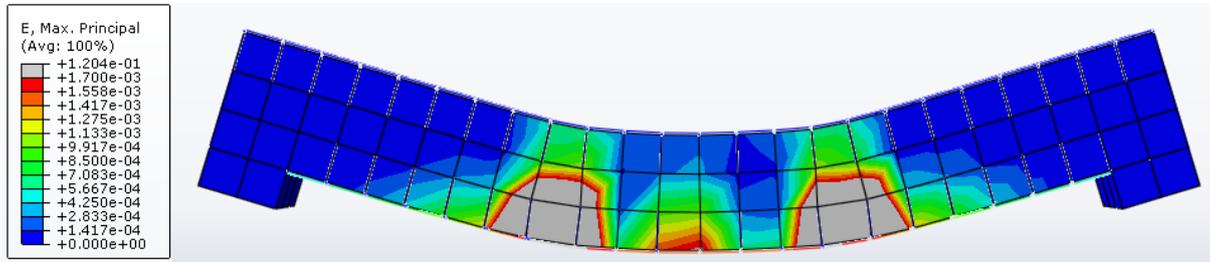
الشكل (377-) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=0.62\text{ mm}$ في R100

وكما في R50 فإن اللبف السفلي في المقطع العرضي عند منتصف الجائز قد تجاوزت فيه قيمة التشوه النسبي الرئيسي 4.25×10^{-4} (الشكل 7-38)، وهذا ما يفسر الانخفاض الثاني عند انتقال $\delta=1.72\text{mm}$ في منحنى قوة – انتقال للجائز R100.

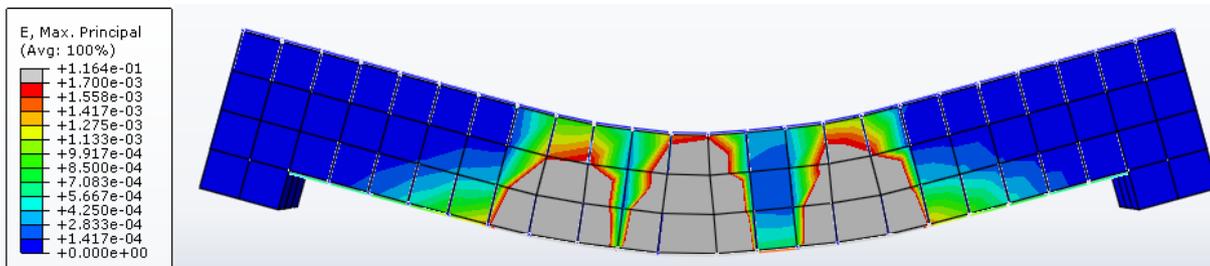


الشكل (387-) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=1.72\text{ mm}$ في R100

تثبت القوة تقريبا عندما يدخل التسليح مرحلة السيالان عند انتقال $\delta=2.16\text{mm}$ والموافقة لقوة 28 KN (الشكل 39-7)، وبعدها يتشكل المفصل اللدن وينهار الجائز عندما تمتد الشقوق على كامل المقطع وتكون القوة قد بلغت 29.9KN مع انتقال $\delta=5\text{mm}$ (الشكل 40-7).



الشكل (39-7) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=2.16\text{ mm}$ في R100 وبدء سيالان فولاذ التسليح



الشكل (40-7) التشوهات النسبية الرئيسية عند $\delta=5\text{ mm}$ في R100 وحدوث الانهيار

أيضاً في R100 كان الانهيار الذي أعطاه النموذج التحليلي مشابه إلى حد كبير لانهيار الجائز تجريبياً (الشكل 41-7)، حيث امتد الشق المتشكل في المنتصف واتسع مع شقوق أخرى على جانبيه.



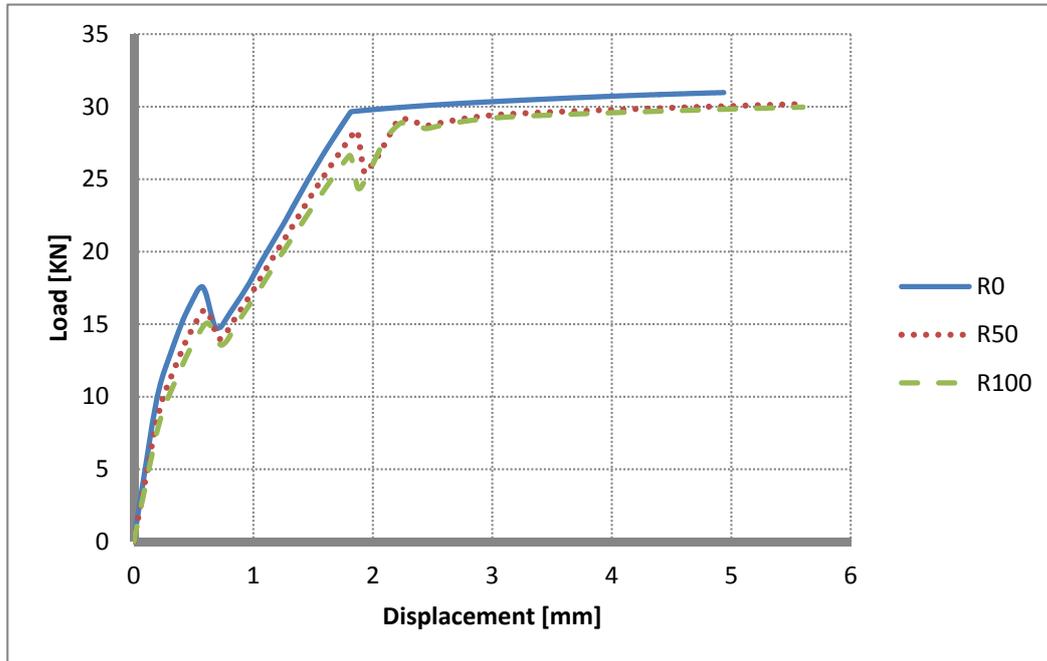
الشكل (41-7) تشقق الجائز R100 وانهياره تجريبياً

3-6-7 مقارنة النتائج التحليلية مع اختلاف نسبة الركام المعاد تدويره:

The Comparison between Numerical Results for Different RA Ratios

يوضح الشكل (42-7) نتائج الدراسة التحليلية للجوائز الثلاثة R0، R50، R100 معاً، حيث لم يؤثر وجود الركام المعاد تدويره على تحمل الجوائز على الانعطاف وهذا ما تم الوصول له في الدراسة التجريبية الفصل الخامس

الفقرة 5-5، وسبب ذلك أن نسبة التسليح المختارة تجعل الانهيار على الشد وبالتالي فإن للتسليح الدور الأساسي في تحديد قدرة تحمل الجائز واختلاف مقاومة الضغط بسبب وجود الركام المعاد تدويره لا تأثير لها.



الشكل (427-) نتائج الدراسة التحليلية للجوائز الثلاثة R100، R50، R0 (الدراسة الحالية)

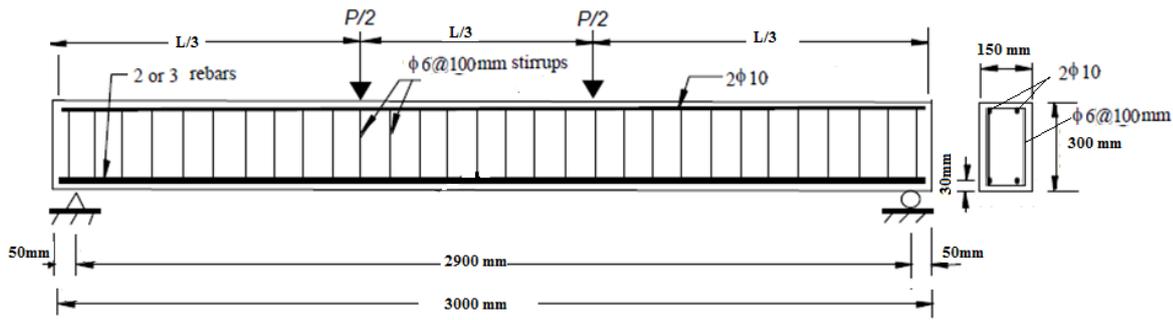
مما سبق يمكن القول أن النموذج الرياضي المعتمد أعطى نتائج مقبولة بالمقارنة مع النتائج التجريبية من حيث شكل وحمولة الانهيار وكذلك الانتقال الموافق له، وبالتالي يمكن اعتماده في دراسة جوائز بأبعاد أكبر ونسب تسليح مختلفة كما سيأتي في الفقرة التالية.

7.7 دراسة أثر الركام المعاد تدويره على تحمل الجوائز على الانعطاف بتغير نسبة التسليح:

The Influence of RA on Bending Bearing of Beams with Changing reinforcement Ratio

في هذه الدراسة تم إجراء دراسة تحليلية لجائز بأبعاد أكبر من الجائز المختبر تجريبيا وتمت مقارنة القوة التي يحدث عندها الانهيار وكذلك الانتقال الموافق لذلك من أجل الجوائز R100، R50، R0، وتمت المقارنة باعتماد القوة الأعظمية التي يتحملها الجائز.

يوضح الشكل (7-43) الجائز الذي تم إجراء دراسة تحليلية له حيث تم تكبير الجائز المختبر تجريبيا وأصبحت أبعاد مقطعه 300x150mm بمجاز 3000mm مع تغطية مقدارها 30mm، التسليح الطولي السفلي كان بأقطار مختلفة بحسب نسبة التسليح المراد دراستها في الجائز، أما التسليح الطولي العلوي فكان 2φ10mm وتم افتراض إجهاد الخضوع للتسليح الطولي 420MPa، كما تم وضع أساور عرضية φ6/100mm وتم اعتبار إجهاد الخضوع لها 275MPa، شروط التحميل والاستناد مشابه للجائز المختبر تجريبيا.



الشكل (437-) المقطع الطولي والعرضي للجائز الثاني المدروس تحليلياً

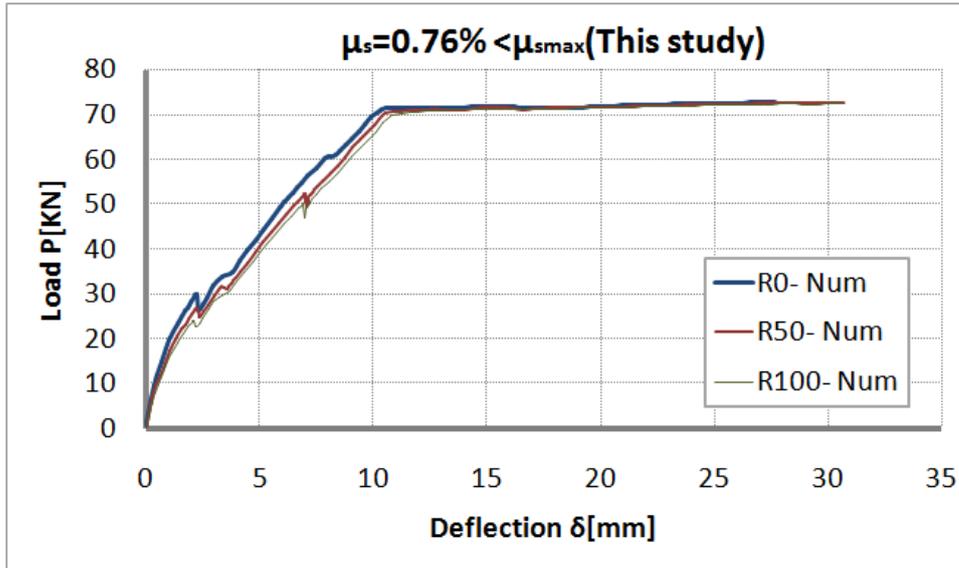
تم إيجاد جميع المنحنيات التي تتطلبها هذه الدراسة التحليلية بنفس الطريقة التي تم شرحها في توصيف النموذج الرياضي المعتمد وذلك من أجل النسب الثلاثة نفسها من الركام المعاد تدويره 0%، 50%، 100% والموافقة لـ R0، R100، R50.

ولدراسة أثر الركام المعاد تدويره على الحمل الأعظمي على الانعطاف من أجل أنماط انهيار مختلفة تم أخذ عدة نسب تسليح بحيث تكون أعلى وأدنى من نسبة التسليح العظمى الموافقة للجائز R0 $\mu_{s\max} = 1.53\%$ ونسبة التسليح التوازنية $\mu_{sb} = 3.06\%$ وتم إجراء دراسة تحليلية وفيما يلي توضيح للنتائج التي تم الحصول عليها.

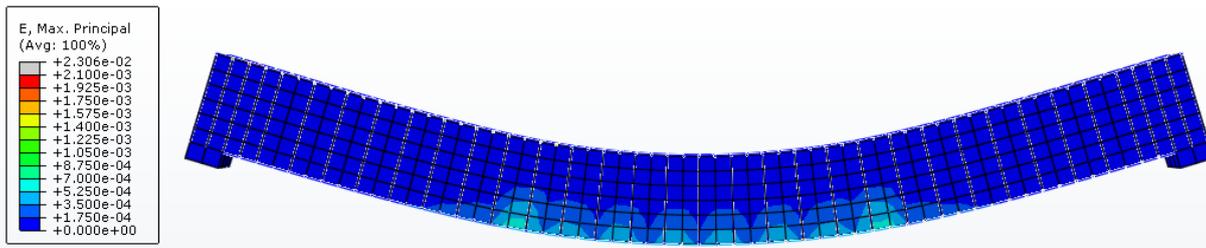
$$\bullet \text{ نسبة تسليح أدنى من العظمى } \mu_s = 0.76\% \leq \mu_{s\max}$$

يوضح الشكل (7-44) منحنيات قوة- انتقال للجوائز المسلحة الثلاثة R0، R50، R100 من أجل $\mu_s = 0.76\%$ ، يظهر من الشكل أن الانهيار حصل بعد أن خضع التسليح وتشكل مفصل لدن، وهذا ما يدل عليه ثبات القوة مع الانتقال حتى حصول الانهيار. يظهر من الشكل أيضاً التقارب الكبير في قيمة الحمل الأعظمي والذي حصل عنده سيلان التسليح من أجل الجوائز الثلاثة على الرغم من اختلاف نسبة الركام المعاد تدويره المستخدمة فيها وسبب ذلك أن اختلاف مقاومة للخرسانة بين هذه الجوائز لا يؤثر كثيراً كون العنصر المسيطر في هذه الحالة هو التسليح، حيث بلغ الحمل الأعظمي والذي حصل عنده سيلان التسليح في R0 قيمة 71.4KN مع انتقال $\delta = 10.5\text{mm}$ ، أما في R50 فقد كان 70.3KN مع $\delta = 10.53\text{mm}$ ، في حين أنه في R100 كان 70KN والانتقال كان أعلى قليلاً $\delta = 11.19\text{mm}$ أي أنه زاد عن R0 بنسبة 6% بسبب اختلاف قيمة معامل المرونة.

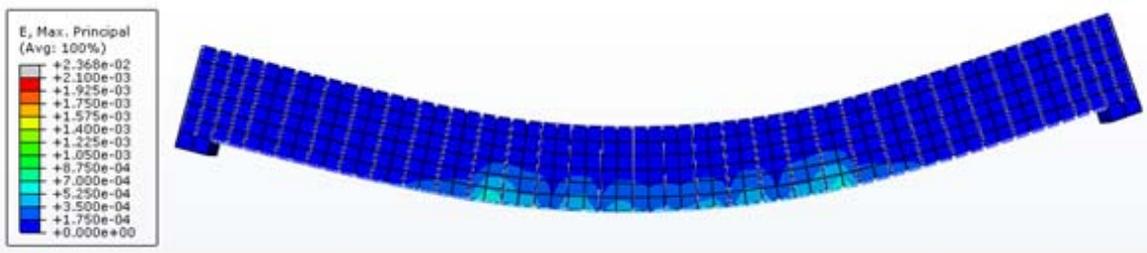
يظهر في المنحنيات الثلاثة حصول هبوط بسيط في قيمة القوة التي يتحملها الجائز عندما تجاوز الانتقال القيمة $\delta = 2\text{mm}$ ، وقد تم الإشارة إلى تفسير هذه الظاهرة والتي سببها حدوث التشققات بحسب (Floros and Ingason, 2013) في الفقرة 5-3-5 (الشكل 5-3). تم العودة إلى مخططات التشوهات النسبية عند النقاط التي تقابل الانكسارات الحاصلة في المنحني، وتبين أنها تترافق مع بدء تشكل الشقوق، الأشكال (7-45)، (7-46)، (7-47).



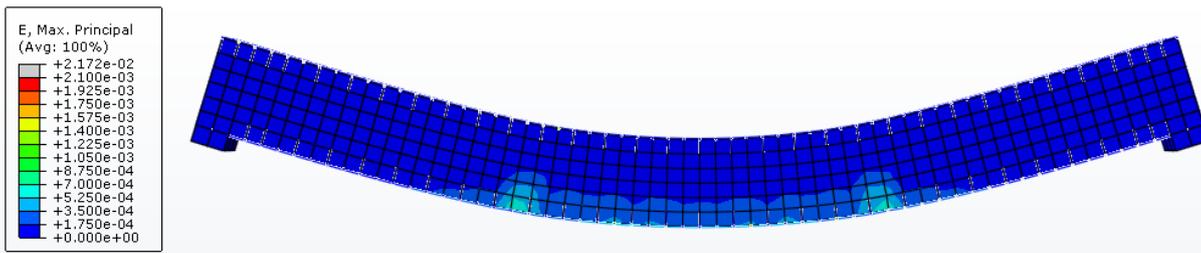
الشكل (447)- منحنيات قوة- انتقال للجوائز المسلحة الثلاثة R100 ،R50 ،R0 من أجل $\mu_s = 0.76\%$



الشكل (457)- مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند بدء التشقق في الجانز R0 عند $\delta = 2.22\text{mm}$

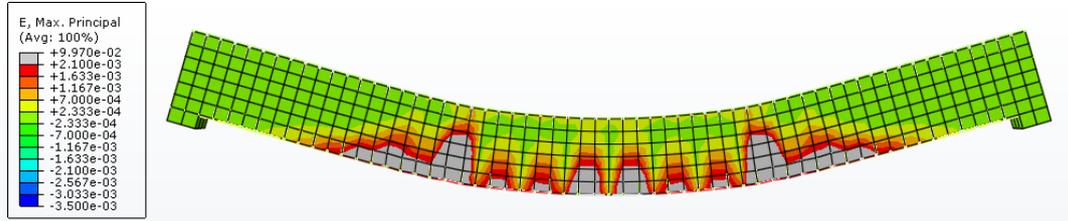


الشكل (467)- مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند بدء التشقق في الجانز R50 عند $\delta = 2.23\text{mm}$

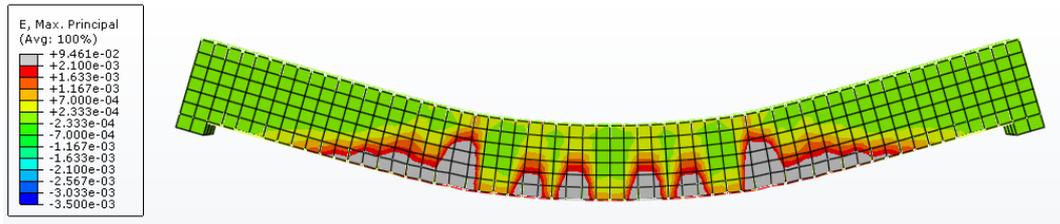


الشكل (477)- مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند بدء التشقق في الجانز R100 عند $\delta = 2.20\text{mm}$

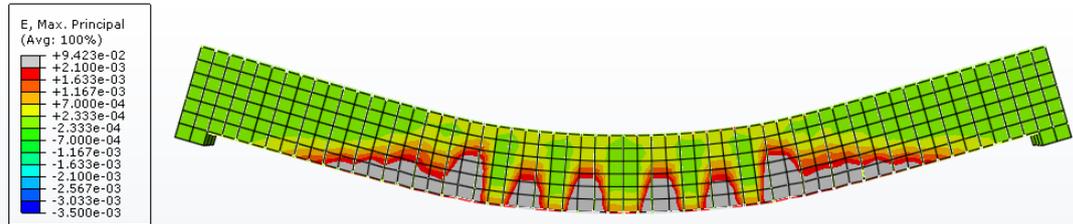
خضع التسليح في الجوائز الثلاثة وتشكل المفصل اللدن عندما تجاوز الانتقال $\delta=10\text{ mm}$ ، وهذا ما دلّ عليه ثبات القوة مع الانتقال حتى حصول الانهيار، والأشكال (7-48)، (7-49)، (7-50) توضح التشوهات النسبية الرئيسية المقابلة في الجوائز R0، R50، R100 على الترتيب.



الشكل (487-) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند سيلان التسليح وتشكل المفصل اللدن في الجائز R0 عند $\delta=10.5\text{mm}$

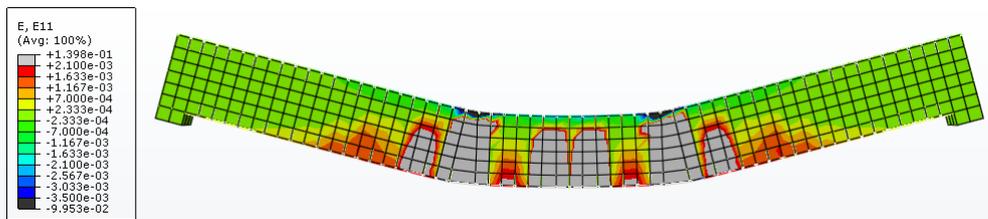


الشكل (497-) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند سيلان التسليح وتشكل المفصل اللدن في الجائز R50 عند $\delta=10.53\text{mm}$

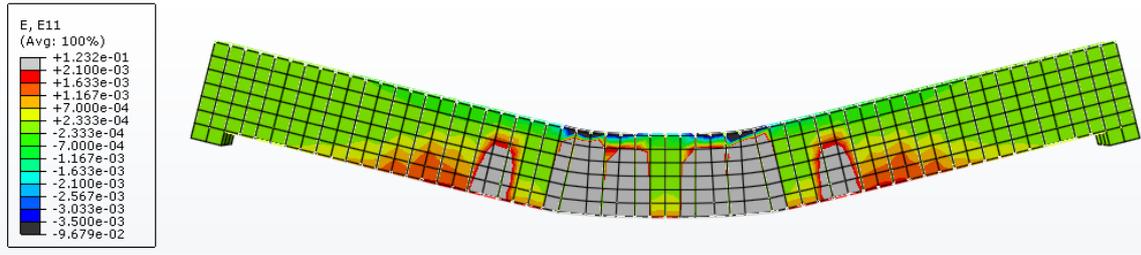


الشكل (507-) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند سيلان التسليح وتشكل المفصل اللدن في الجائز R100 عند $\delta=11.19\text{mm}$

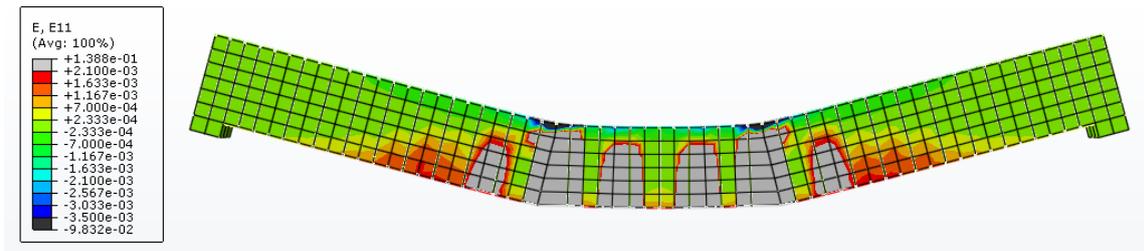
يحدث الانهيار عندما تمتد الشقوق باتجاه أعلى المقطع ويرافق ذلك انهيار الألياف العلوية على الضغط نتيجة ازدياد الإجهادات الضاغطة التي يخضع لها الجزء العلوي من المقطع العرضي، ويظهر شكل الانهيار هذا من خلال التشوهات النسبية المحورية للجوائز R0، R50، R100 في نهاية التحليل والموضحة في الأشكال (7-51)، (7-52)، (7-53) على الترتيب.



الشكل (517-) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجائز R0



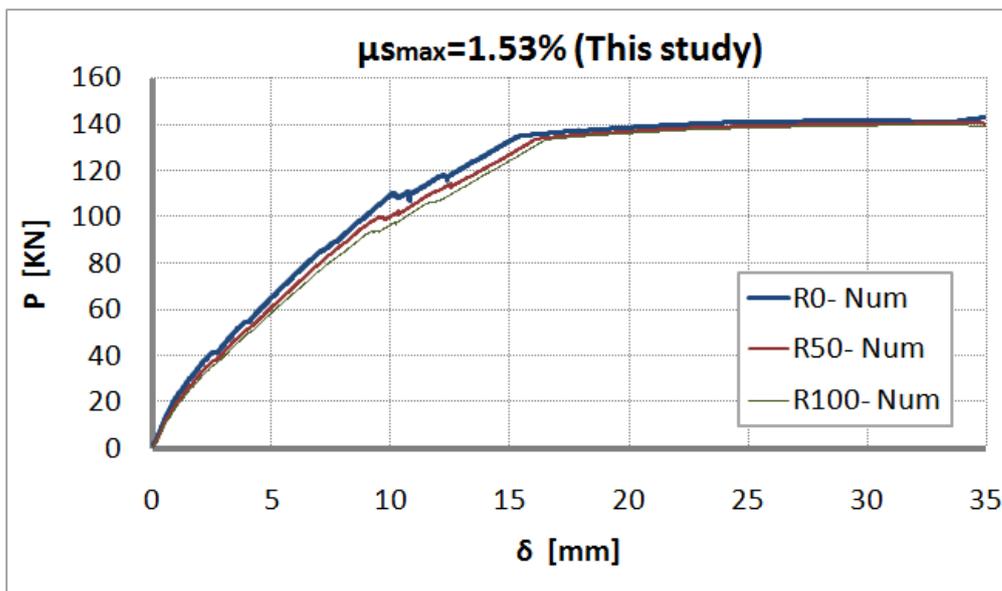
الشكل (527-) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجانز R50



الشكل (537-) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجانز R100

• نسبة تسليح مساوية للأعظمية $\mu_{s\max} = 1.53\%$

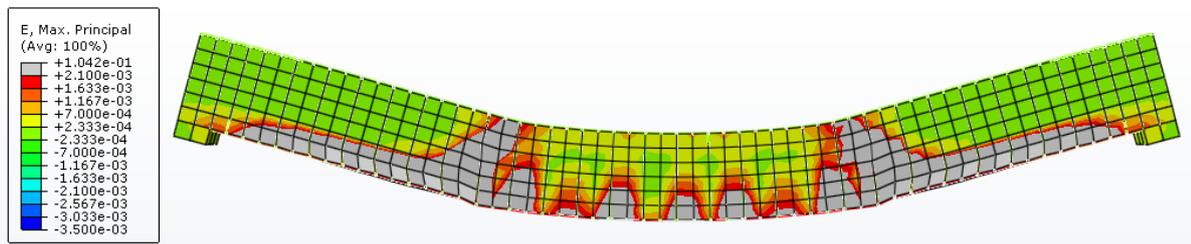
تم رفع نسبة التسليح في الجوائز الثلاثة لتكون مساوية لنسبة التسليح الأعظمية $\mu_{s\max} = 1.53\%$ للجائز R0، ويوضح الشكل (54-7) منحنيات قوة- انتقال للجوائز المسلحة الثلاثة R0، R50، R100 من أجل هذه النسبة.



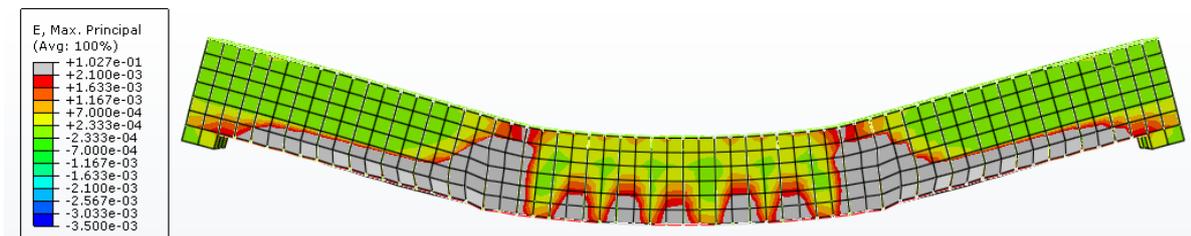
الشكل (547-) منحنيات قوة- انتقال للجوائز المسلحة الثلاثة R0، R50، R100 من أجل $\mu_{s\max} = 1.53\%$

إن ما تم لحظه في الحالة السابقة من التقارب الكبير في الحمل الأعظمي الذي يحدث عنده الانهيار للجوائز الثلاثة والذي بلغ 140KN يتكرر هنا كون نسبة التسليح لم تتجاوز الحد الأعظمي بعد والمسيطر على نمط الانهيار هو التسليح والذي يحقق الانهيار على الشد وبالتالي اختلاف مقاومة الضغط باختلاف نسبة الركام المعاد تدويره ليس لها تأثير.

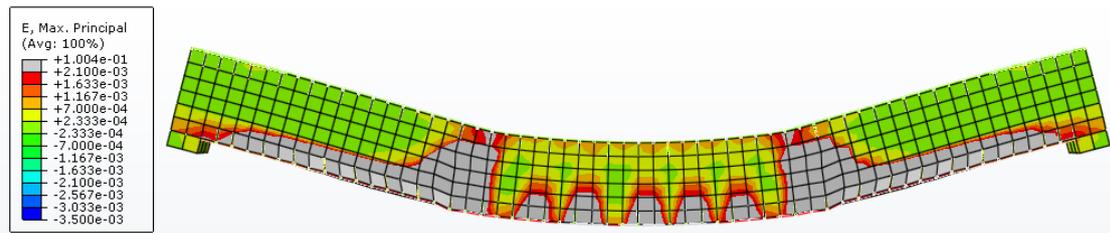
تُظهر الأشكال (55-7)، (56-7)، (57-7) التشوهات النسبية الرئيسية عند النقاط المقابلة لسيلان التسليح وتشكل المفصل اللدن للجوائز R0، R50، R100 على الترتيب. ويجدر الذكر بأنه ظهر تأثير الركام المعاد تدويره على الانتقالات الحاصلة عند هذه النقاط بشكل طفيف حيث ازدادت مع ازدياد نسبة الركام المعاد تدويره في الجائز حتى نسبة 8% في R100 حيث من أجل R0، R50، R100 كانت الانتقالات مقاسة بـ مم هي 15.52، 16.32، 16.73 مع قوة مساوية لـ 132.64، 134، 135.1 KN على الترتيب.



الشكل (557-) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند سيلان التسليح وتشكل المفصل اللدن في الجائز R0 عند $\delta=15.53$ mm

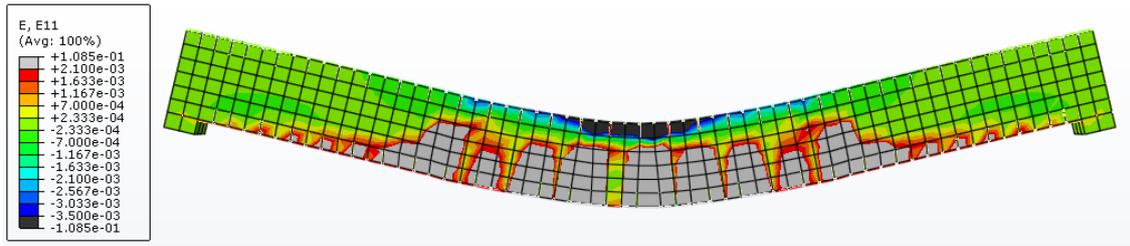


الشكل (567-) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند سيلان التسليح وتشكل المفصل اللدن في الجائز R50 عند $\delta=16.32$ mm

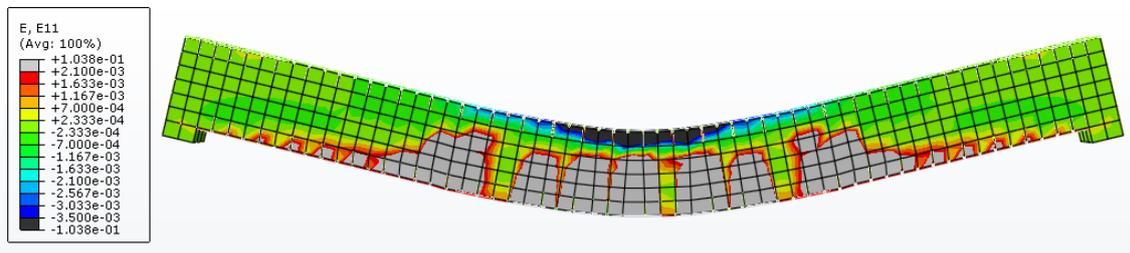


الشكل (577-) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند سيلان التسليح وتشكل المفصل اللدن في الجائز R100 عند $\delta=16.73$ mm

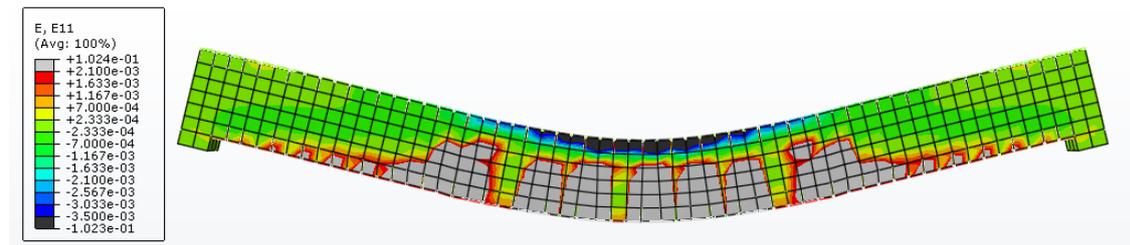
توضح الأشكال (58-7)، (59-7)، (60-7) التشوهات المحورية والتي تظهر شكل الانهيار في نهاية التحليل للجوائز R0، R50، R100 على الترتيب حيث يظهر تشقق الخرسانة في وانهيار الجزء العلوي على الضغط كما في الحالة السابقة.



الشكل (-587) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجانز R0



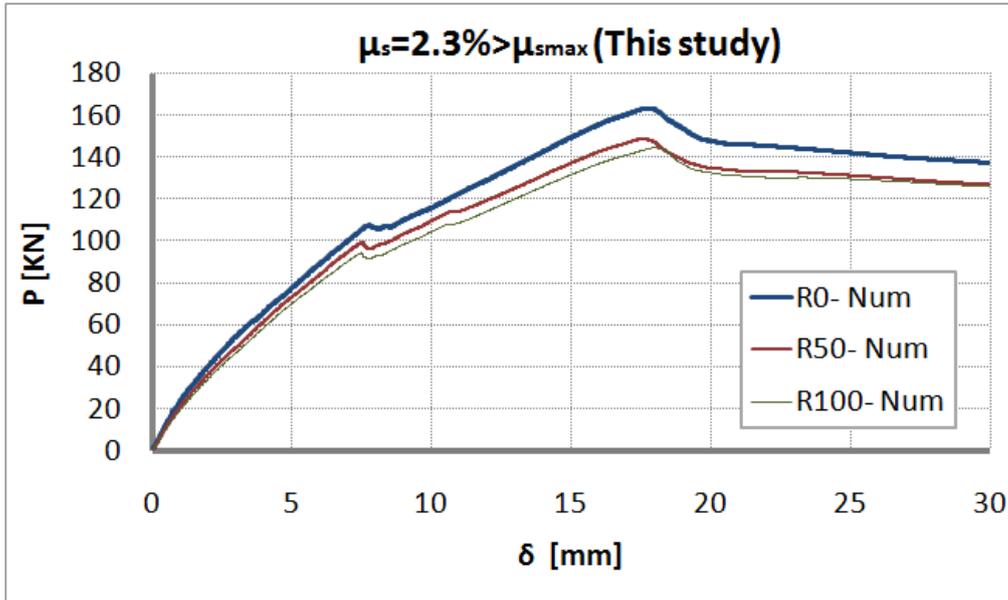
الشكل (-597) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجانز R50



الشكل (-607) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجانز R100

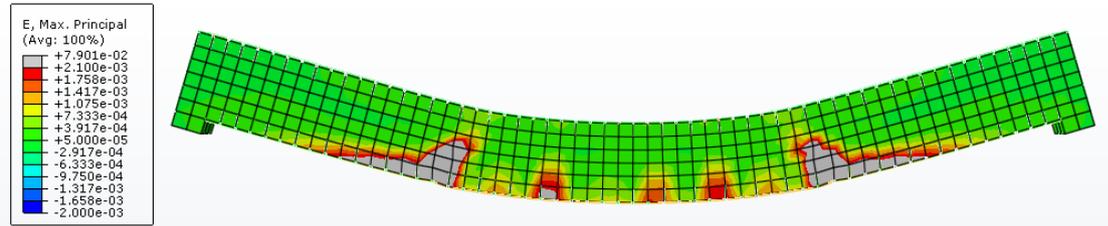
• نسبة تسليح أعلى من العظمى $\mu_s = 2.3\%$

تم رفع نسبة التسليح لتتجاوز نسبة التسليح الأخرى $\mu_s = 2.3\% > \mu_{s \max}$. يوضح الشكل (61-7) منحنيات قوة انتقال للجوائز الثلاثة R0، R50، R100 من أجل هذه النسبة.

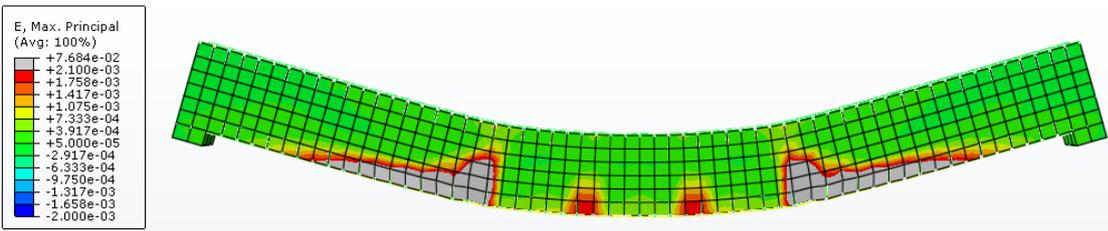


الشكل (617-) منحنيات قوة- انتقال للجوائز المسلحة الثلاثة R0، R50، R100 من أجل $\mu_s = 2.3\%$

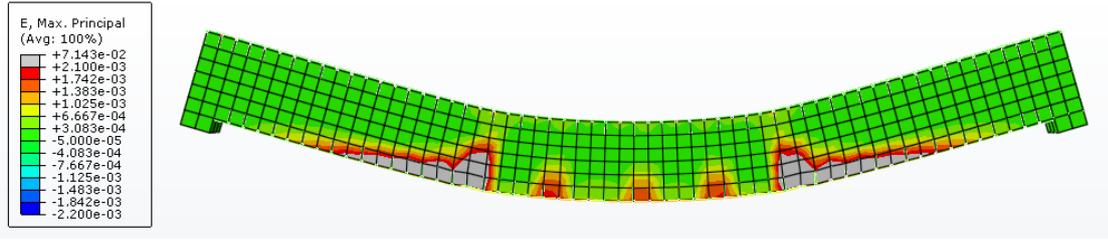
ظهر في جميع المنحنيات هبوط بسيط في مقدار القوة عند انتقال $\delta = 7.5 \text{ mm}$ تقريبا، وافق هذا الهبوط بدء اتساع الشقوق في وسط الجائز بين نقطتي التحميل وهذا ما تبينه مخططات التشوهات النسبية الرئيسية الموضحة في الأشكال (62-7)، (63-7)، (64-7).



الشكل (627-) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند بدء التشقق في الجائز R0 عند $\delta = 7.68 \text{ mm}$

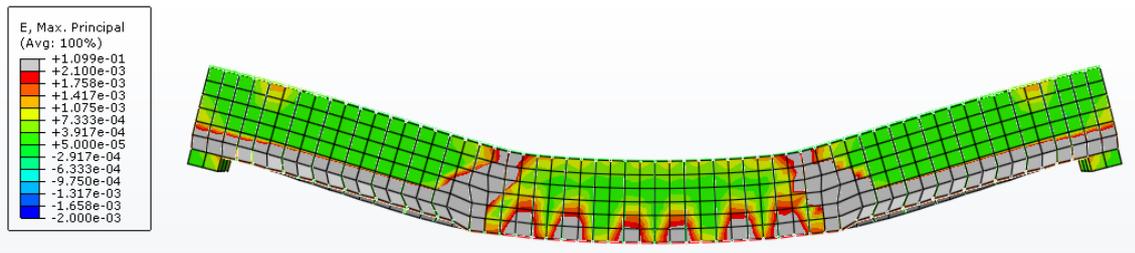


الشكل (637-) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند بدء التشقق في الجائز R50 عند $\delta = 7.53 \text{ mm}$

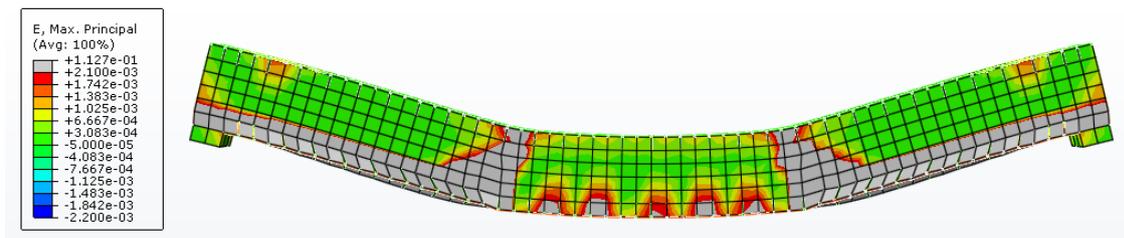


الشكل (647-) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند بدء التشقق في الجانز R100 عند $\delta=7.50 \text{ mm}$

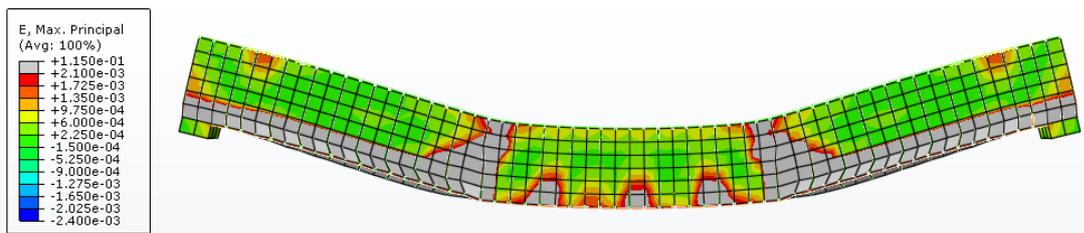
يتضح من الشكل (61-7) أيضاً أن الجوائز الثلاثة انهارت بشكل مفاجئ على الضغط أي أن التسليح لم يخضع ولم يتشكل مفصل لدن، كما تم ملاحظة أنه كلما زادت نسبة الركام المعاد تدويره كلما كانت القوة الأعظمية التي يتحملها المقطع أقل، ويفسر ذلك بأنه بسبب شكل الانهيار الحاصل فإن لمقاومة الخرسانة على الضغط دور في تحديد هذه القوة وبما أن مقاومة الضغط تقل كلما زادت نسبة الركام المعاد تدويره فإن القوة انخفضت عند R50 بنسبة 10% في حين أنها انخفضت بمقدار 12% عند R100 وذلك بالمقارنة مع R0. و توضح الأشكال (65-7)، (66-7)، (67-7) التشوهات النسبية الرئيسية المقابلة لذروة منحنى قوة- انتقال للجوائز R100، R50، R0 على الترتيب.



الشكل (657-) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند ذروة المنحنى في الجانز R0 والموافقة لـ $\delta=17.76 \text{ mm}$

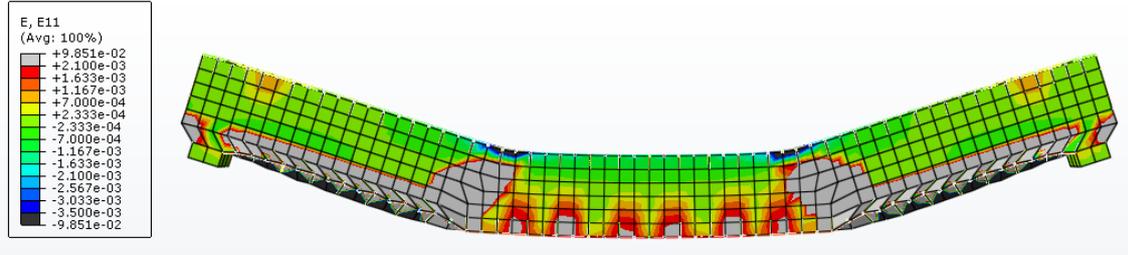


الشكل (667-) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند ذروة المنحنى في الجانز R50 والموافقة لـ $\delta=17.8 \text{ mm}$

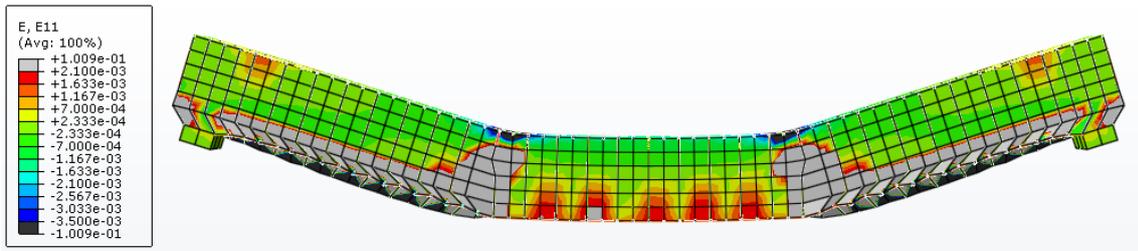


الشكل (677-) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند ذروة المنحنى في الجانز R100 والموافقة لـ $\delta=18.01 \text{ mm}$

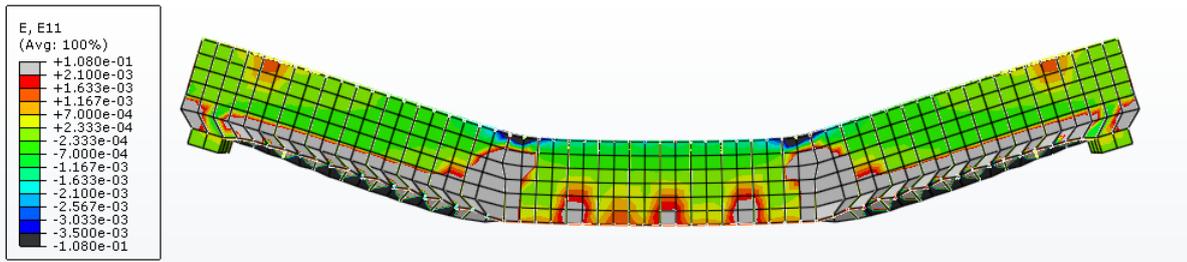
يظهر من خلال مخططات التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل للجوائز الثلاثة R0، R50، R100 والتي توصلها الأشكال (7-68)، (7-69)، (7-70) على التتالي بأن الانهيار حصل نتيجة انهيار الجزء العلوي من المقطع العرضي على الضغط رافقه امتداد شق بشكل رئيسي وذلك تحت نقاط ارتكاز الحمل.



الشكل (7-68) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجائز R0



الشكل (7-69) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجائز R50

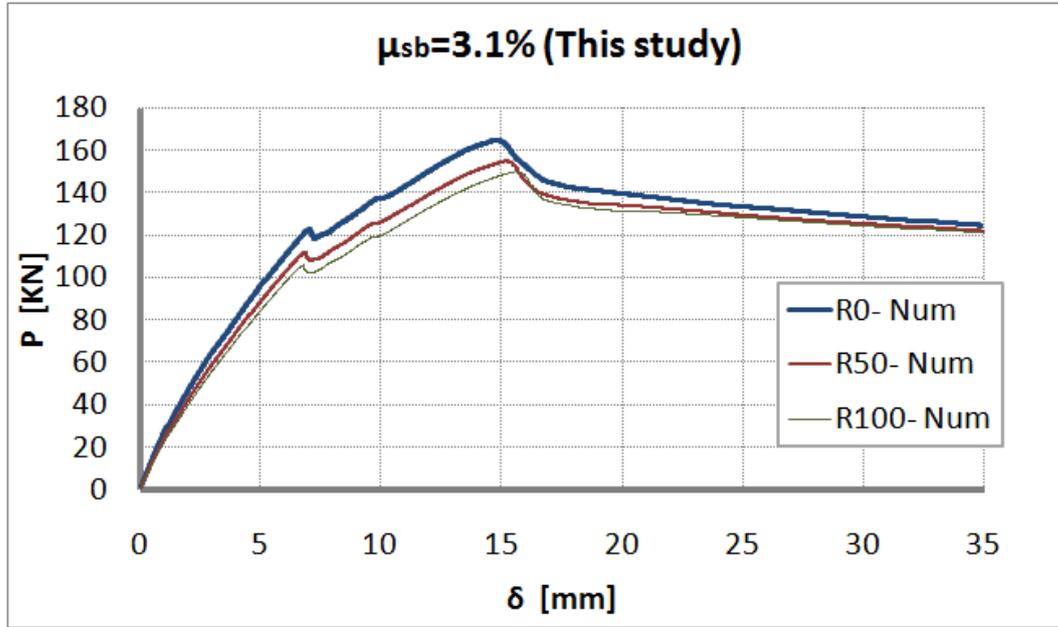


الشكل (7-70) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجائز R50

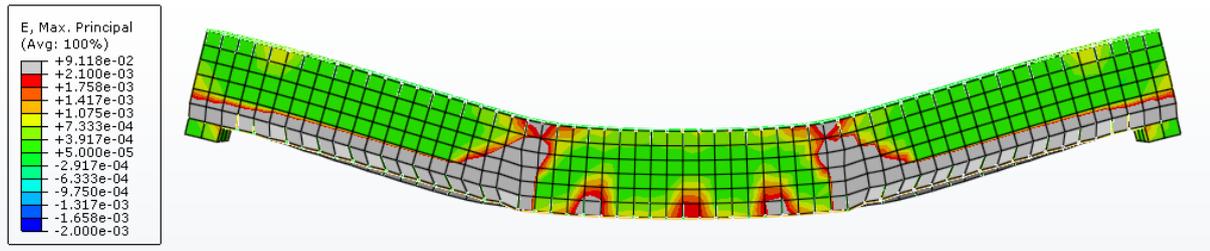
• نسبة التسليح التوازنية $\mu_{sb} = 3.1\%$

تم تحليل النماذج الرياضية للجوائز الثلاثة R0، R50، R100 من أجل نسبة تسليح تساوي نسبة التسليح التوازنية في الجائز R0، ويوضح الشكل (7-71) منحنيات قوة- انتقال الناتجة من أجل هذه النسبة.

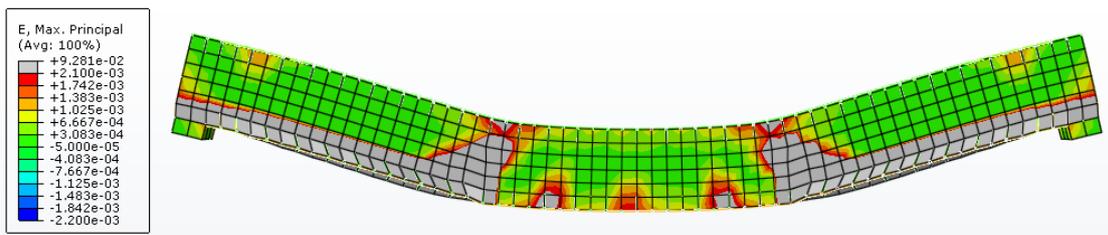
سبب بدء تشكل الشقوق في الجوائز الهبوط الحاصل في المنحنيات عند $\delta=7.5\text{mm}$ تقريبا، كما أن الاختلاف في قيمة القوة الأعظمية التي يتحملها الجائز ترجع لكون الانهيار هنا على الضغط وبالتالي نسبة الركام المعاد تدويره تؤثر على تحمل الجائز. سيتم الاكتفاء هنا بتوضيح مخططات التشوهات النسبية المقابلة لذروة المنحنيات من أجل R0، R50، R100 وذلك في الأشكال (72-7)، (73-7)، (74-7) على الترتيب.



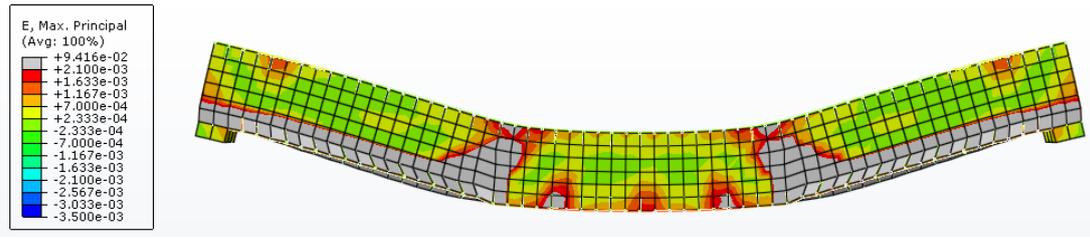
الشكل (71-7) منحنيات قوة- انتقال للجوائز المسلحة الثلاثة R100، R50، R0 من أجل $\mu_{sb} = 3.1\%$



الشكل (72-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند ذروة المنحني في الجائز R0 والموافقة لـ $\delta=14.79\text{ mm}$



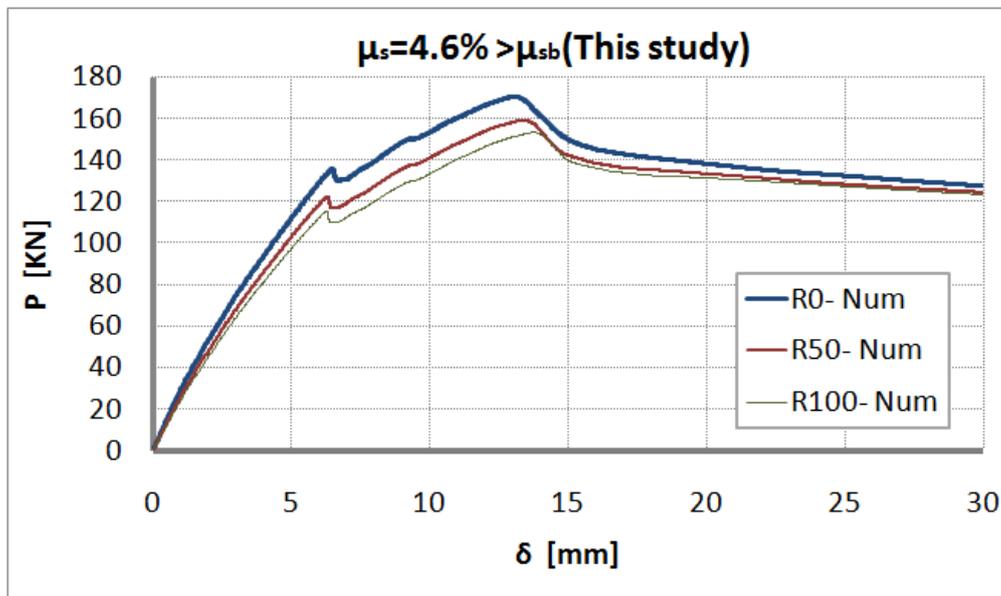
الشكل (73-7) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند ذروة المنحني في الجائز R50 والموافقة لـ $\delta=15.14\text{ mm}$



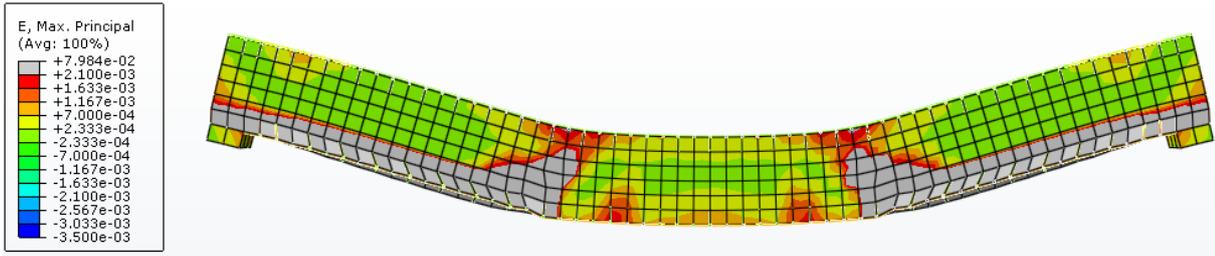
الشكل (7-47) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند ذروة المنحني في الجانز R100 والموافقة لـ $\delta = 15.59 \text{ mm}$

• نسبة تسليح أعلى من التوازنية $\mu_s = 4.6\%$

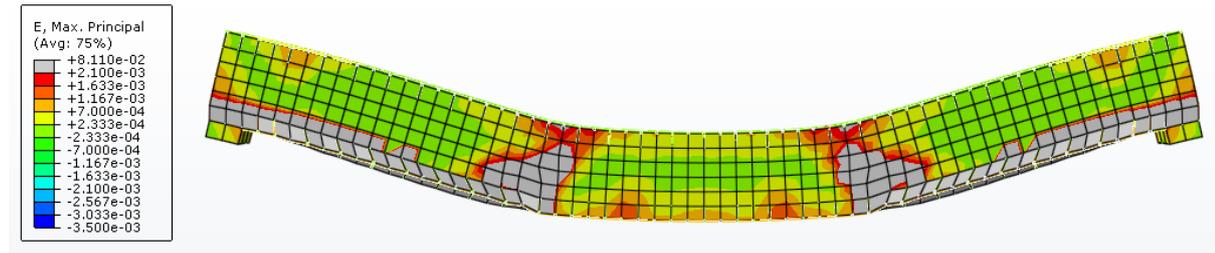
تم إيجاد منحنيات قوة-انتقال من أجل نسبة تسليح أعلى من نسبة التسليح التوازنية $\mu_s = 4.6\% > \mu_{sb}$ والموضحة في الشكل (7-75)، يتضح من هذا الشكل أن قيمة القوة التي يتحملها الجانز قد قلت مع زيادة نسبة الركام المعاد تدويره لنفس السبب الذي ذكر في الحالات السابقة والتي ظهر فيها الانهيار الهش. يظهر من خلال مخططات التشوهات النسبية الرئيسية للجوائز الثلاثة R0، R50، R100 عدم تشكل الشقوق في وسط الجانز في المنطقة بين نقطتي تطبيق القوتين عند النقاط المقابلة للذروة عند انتقال $\delta = 13 \text{ mm}$ تقريبا والتي توضحها الأشكال (7-76)، (7-77)، (7-78). يظهر هذا المر أيضا في مخططات التشوهات المحورية عند نهاية التحليل والموضحة في الأشكال (7-79)، (7-80)، (7-81) الأمر الذي يفيد بأن الانهيار كان مفاجئاً وهشاً بشكل كبير وذلك لأن التسليح أصبح أعلى من نسبة التسليح التوازنية.



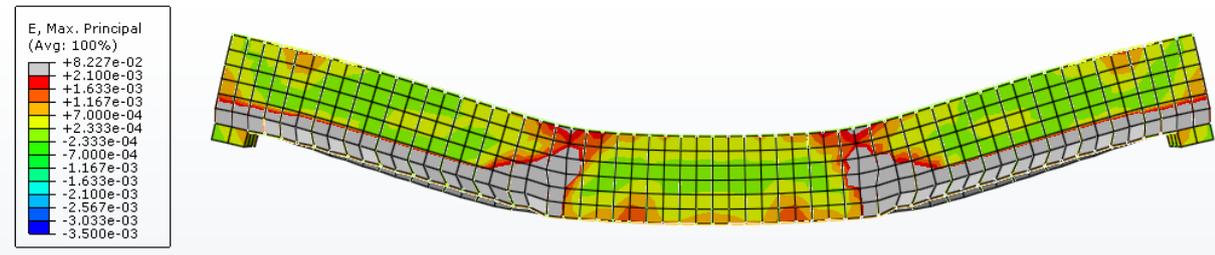
الشكل (7-57) منحنيات قوة-انتقال للجوائز المسلحة الثلاثة R0، R50، R100 من أجل $\mu_s = 4.6\%$



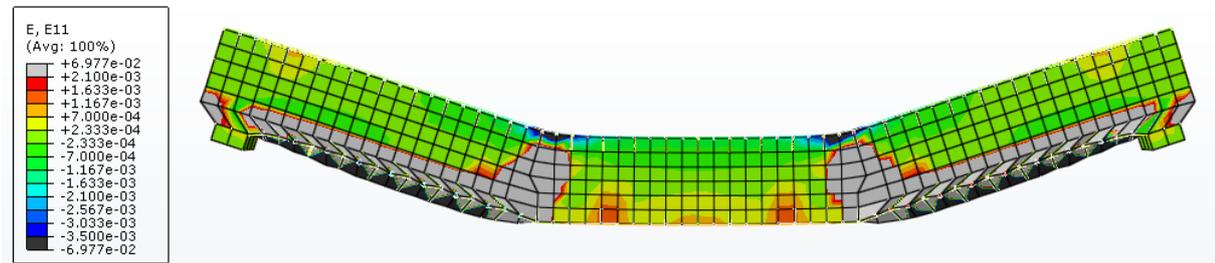
الشكل (-767) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند ذروة المنحني في الجانز R0 والموافقة لـ $\delta=13.04$ mm



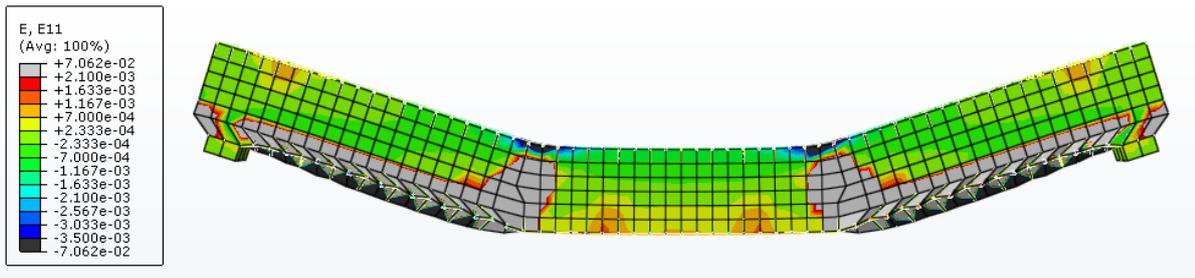
الشكل (-777) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند ذروة المنحني في الجانز 05R والموافقة لـ $\delta=13.52$ mm



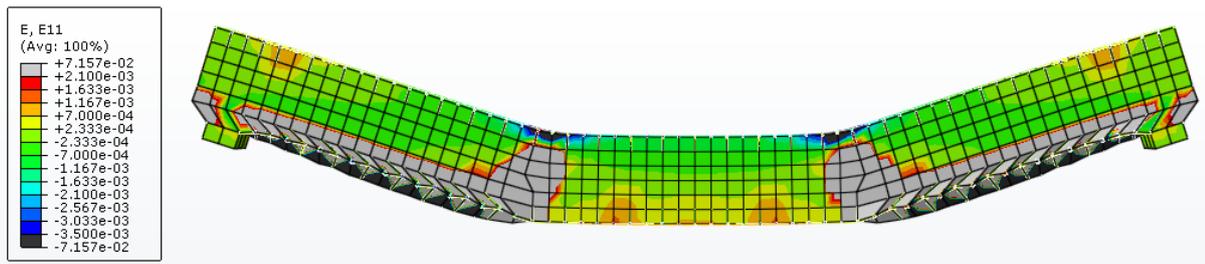
الشكل (-787) مخطط التشوهات النسبية الرئيسية عند ذروة المنحني في الجانز R100 والموافقة لـ $\delta=13.73$ mm



الشكل (-797) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجانز R0



الشكل (807-) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجانز R50



الشكل (817-) مخطط التشوهات النسبية المحورية في نهاية التحليل في الجانز R100

8.7 ملخص الدراسة التحليلية من أجل نسب التسليح المدروسة:

The Abstract of The Numerical Study for Studied Reinforcement Ratios

يوضح الجدول (3-7) نتائج الدراسة العددية عند تغيير نسب التسليح بما يخص القوة الأعظمية والانتقال الموافق في الجوائز التي تم تحليلها، حيث تم اختيار نسب تسليح أخفض أو تساوي نسبة التسليح الأعظمية لـ R0 حتى يتم الانهيار على الشد، وكذلك تم اختيار نسب تسليح أعلى من نسبة التسليح الأعظمية حتى يكون الانهيار على الضغط. تم إيجاد نسبة الحمل الأعظمي في الجوائز التي تحوي ركام معاد تدويره P_{max} إلى الحمل الأعظمي للجوائز R0 وهو P_{0max} .

تم في الجدول (3-7) إيجاد $\varepsilon_s / \varepsilon_y$ وهي نسبة التشوه الطولي في التسليح المقابل للقوة العظمى المطبقة P_{max} إلى التشوه المقابل لإجهاد الخضوع والمساوي لـ 2.1×10^{-3} . يظهر من القيم أنه عندما كانت التسليح المستخدم أقل أو مساوياً للتسليح الأعظمي فإن قيمة هذه النسبة تجاوزت الواحد أي أن التسليح قد دخل مرحلة السيلا، أما عندما تم استخدام تسليح أكبر من التسليح الأعظمي فإن هذه النسبة كانت أصغر من الواحد أي أن التشوه الطولي في التسليح لم يصل بعد لـ ε_y أي أن التسليح لم يدخل في مرحلة السيلا وهذا يعني بأن الانهيار الحاصل كما تم توضيحه سابقاً هشاً وهو على الضغط.

تم تمثيل النتائج المدرجة في الجدول (3-7) في الشكل (82-7) حيث المحور الأفقي هو نسبة التسليح المستخدمة μ_s منسوبة لـ μ_{smax} ، أما المحور الشاقولي فيمثل القوة في الجوائز المدروس P_{max} منسوبة إلى القوة في الجوائز R0 وهي P_{0max} من أجل نفس نسبة التسليح. يظهر من هذا الشكل أنه من أجل نسب تسليح أدنى من نسبة التسليح العظمى فإن قدرة تحمل الجوائز على الانعطاف لم تتأثر أما من أجل نسب تسليح أعلى من ذلك فإن نسبة الانخفاض في قدرة

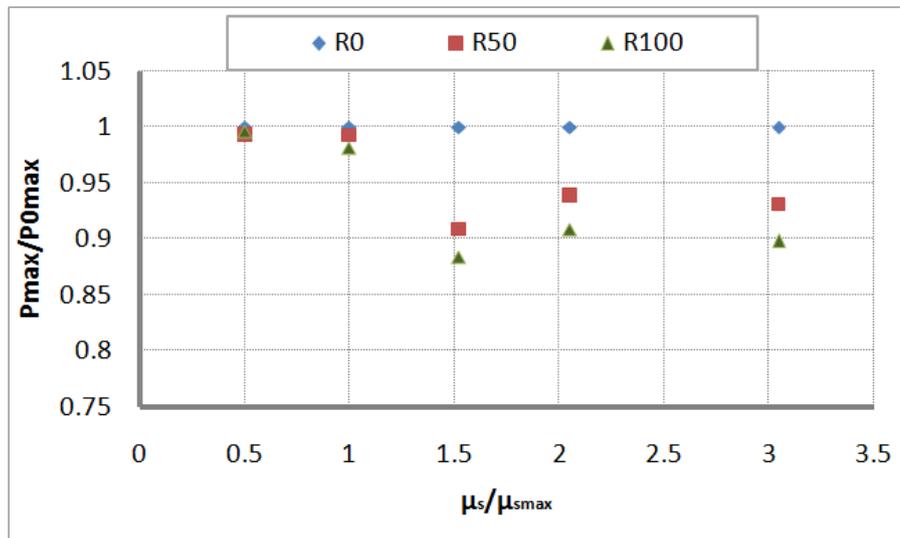
تحمل الجوائز على الانعطاف في حالة خرسانة مع ركام معاد تدويره لم تتجاوز 12% بالمقارنة مع الخرسانة بركام طبيعي.

يظهر من الشكل (7-82) أن القوة من أجل النسبة $\frac{\mu_s}{\mu_{smax}} = 1.5$ كانت أخفض من باقي النسب التي هي أعلى

منها. يظهر بالعودة إلى الشكلين (7-66)، (7-67) أن الجوائز الحاوية على هذه النسبة قد حصل فيها انهيار على الضغط وأيضاً تشكلت تشققات في منتصف الجائز وبالتالي فإن المقطع قد ساهم في انهياره الأمرين معاً وكون كل من مقاومة الضغط والشد لخرسانة بركام معاد تدويره أخفض من الخرسانة بركام طبيعي فإن القوة الأعظمية لها أخفض من الجوائز التي لم تظهر فيها تشققات في منتصف الجائز وانهارت بشكل مفاجئ تماماً نتيجة وصول المقطع لطاقته العظمى على الضغط.

الجدول (7-3) نتائج الدراسة العددية عند تغير نسب التسليح بما يخص القوة الأعظمية والانتقال الموافق في الجوائز المدروسة

| μ_s | μ_s/μ_{smax} | beam | RA% | δ [mm] | P_{max} [KN] | P_{max}/P_{0max} | ϵ_s/ϵ_y |
|---------|--------------------|------|-----|---------------|----------------|--------------------|-------------------------|
| 0.76% | 0.5 | R0 | 0 | 27.7 | 72.75 | 1.00 | 20.49 |
| | | R50 | 50 | 30.72 | 72.28 | 0.99 | 23.76 |
| | | R100 | 100 | 31.72 | 72.5 | 1.00 | 25.08 |
| 1.51% | 1 | R0 | 0 | 15.52 | 135.1 | 1.00 | 1.24 |
| | | R50 | 50 | 16.32 | 134.1 | 0.99 | 1.21 |
| | | R100 | 100 | 16.38 | 132.64 | 0.98 | 1.09 |
| 2.30% | 1.5 | R0 | 0 | 17.76 | 163.38 | 1.00 | 0.77 |
| | | R50 | 50 | 17.8 | 148.49 | 0.91 | 0.72 |
| | | R100 | 100 | 18.01 | 144.44 | 0.88 | 0.72 |
| 3.10% | 2 | R0 | 0 | 14.79 | 165.19 | 1.00 | 0.55 |
| | | R50 | 50 | 15.14 | 155.1 | 0.94 | 0.53 |
| | | R100 | 100 | 15.59 | 150.1 | 0.91 | 0.53 |
| 4.60% | 3 | R0 | 0 | 13.04 | 170.78 | 1.00 | 0.39 |
| | | R50 | 50 | 13.52 | 158.96 | 0.93 | 0.38 |
| | | R100 | 100 | 13.73 | 153.41 | 0.90 | 0.39 |



الشكل (8-27) القوة الأعظمية للجوائز R0 ، R50 ، R100 منسوبة للقوة الأعظمية لـ R0 من الركام المعاد تدويره من أجل نسب تسليح مختلفة

يتضح مما سبق أنه لم تتأثر مقاومة الانعطاف عند استخدام الركام المعاد تدويره في الخلطة الخرسانية ولا سيما أنه لا يجب تجاوز نسبة التسليح الأعظمية، والسبب يعود إلى أنه في حالة العناصر المعرضة للانعطاف فإن مساحة منطقة الخرسانة المضغوطة صغيرة مقارنة بمساحة المقطع الكلي ويتم الاعتماد على تسليح الشد.

9.7 الخلاصة:

أعطى النموذج العددي الذي تم توصيفه في هذا الفصل نتائج قاربت إلى حد كبير النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها من اختبار الجوائز الخرسانية المسلحة في هذا البحث. وبناء عليه تم اعتماد هذا النموذج في دراسة قدرة تحمل الجوائز من أجل جوائز بأبعاد أكبر وينسب تسليح مختلفة تسمح بحصول أنماط انهيار مختلفة، وتبين أن الركام المعاد تدويره لا يؤثر على تحمل الجوائز عندما يكون نمط الانهيار على الشد، أما عندما يكون الانهيار مفاجئاً فإن القوة الأعظمية تنخفض حتى 12% من القوة التي تحققها جوائز بركام طبيعي.

الفصل الثامن

النتائج والتوصيات

Conclusions and Recommendations

1.8 النتائج:

Conclusions

تم في هذا البحث إجراء دراسة تجريبية لتحديد أثر الركام الخشن المعاد تدويره على الخصائص الميكانيكية للخرسانة المنتجة من هذا الركام كمقاومة الضغط والشد بالفلق ومعامل المرونة، كما تم دراسة أثره على قدرة تحمل الجوائز المسلحة المعرضة لانعطاف وذلك عندما يتم استخدامه بنسب مختلفة (0%، 50%، 75%، 100%) مع وبدون إضافات بوزولانية سواء تم استخدام هذه الإضافات كبديل عن الاسمنت أو كإضافة على الخلطة الخرسانية، تم في هذا البحث أيضا تقديم علاقة لحساب معامل المرونة لخرسانة منتجة من ركام معاد تدويره، أثبتت المقارنات التي تم إجراؤها إمكانية استخدامها من أجل هذا النوع من الخرسانة.

تم توسيع الدراسة التجريبية على الجوائز المسلحة من خرسانة منتجة من ركام معاد تدويره بإنشاء نموذج رياضي حاكي التجارب وأعطى نتائج قريبة منها، وتم من خلال هذا النموذج تغيير أبعاد جائز التجربة ونسبة التسليح المستخدمة لدراسة أثر الركام المعاد تدويره على الانعطاف من أجل أنماط انهيار مختلفة، حيث تم وضع نسب تسليح أدنى وأعلى من نسبة التسليح الأعظمية. تمت الدراسة التحليلية للنموذج الرياضي باستخدام طريقة العناصر المحدودة (FEM)، واستخدام التحليل اللا خطي والذي يأخذ بعين الاعتبار لا خطية المادة (Materially Non- Linear Analysis, MNA)، كما تم أخذ أثر التماسك بين كل من الخرسانة وفولاذ التسليح.

تم في نهاية البحث استخلاص النتائج التالية:

1. كثافة الخلطة المنتجة من ركام معاد تدويره وقابلية تشغيلها أقل من الخلطة بركام طبيعي، كذلك ظهر من الخصائص الميكانيكية المدروسة تنخفض مع زيادة محتوى الركام المعاد تدويره، وبالتالي يفضل استخدام الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره أكثر في العناصر الغير حاملة.
2. أعطى استخدام خليط بنسبة 50% من الركام المعاد تدويره مقاومات ضغط عند 28 يوم أقل من مقاومة الخرسانة التقليدية بحدود 10%.
3. استخدام خليط بنسبة 100% و 75% من الركام المعاد تدويره أعطى مقاومات ضغط عند 28 يوم أقل من مقاومة الخرسانة بركام طبيعي بحدود 15%.
4. أدى استخدام ركام معاد تدويره إلى انخفاض مقاومة الشد بنسبة حتى 22% من أجل 100% من الركام المعاد تدويره بالمقارنة مع قيم الشد التي أعطتها الخرسانة بركام طبيعي وذلك في عمر 28 يوم.

5. تأثر معامل المرونة بشكل واضح عند استخدام الركام المعاد تدويره (انخفض بنسب تراوحت بين 20% من أجل 50% من الركام المعاد تدويره حتى 28% من أجل 100% من الركام المعاد تدويره مقارنة مع الخرسانة بركام طبيعي عند 28 يوم)، ولم تؤثر الإضافات بشكل ملموس على تحسين قيمه، لذلك لا بد من الانتباه إلى هذه المسألة عندما يتم استخدام هذا النوع من الخرسانة، من حيث تأثير ذلك على قساوة العناصر الإنشائية وانتقالاتها.
6. شابه سلوك الخصائص الميكانيكية المدروسة في عمر متأخر (120 يوم) السلوك الذي تم لحظه في 28 يوم حيث انخفضت هذه الخصائص مع زيادة محتوى الركام المعاد تدويره في الخلطة. لوحظ تحسن في الخصائص من أجل نفس نسبة الركام المعاد تدويره مع التقدم بالعمر.
7. يمكن استخدام اسمنت بورتلاندي بوزولاني محضر بنسبة 15% سواء مع الركام الطبيعي أو الركام المعاد تدويره عندما يراد الوصول إلى مقاومة الضغط المطلوبة في أعمار متأخرة ولهذا نفع كبير على المستوى الاقتصادي والبيئي، حيث من أجل R100 كانت مقاومة على الضغط 38.1 N/mm^2 في حين من أجل R-100PZ كانت المقاومة للضغط 39.9 N/mm^2 .
8. أعطى استخدام خليط من الركام المعاد تدويره والركام الطبيعي بنسبة 50% مع إضافة البوزولانا على الخلطة بنسبة 15% مقاومة ضغط قريبة جدا وأحيانا أعلى من مقاومة الخلطة النموذجية لكل الأعمار المدروسة (في اليوم 28 كانت مقاومة R0 على الضغط 37.1 N/mm^2 في حين مقاومة a-R50PZ كانت مساوية لـ 36 N/mm^2 في اليوم 120 كانت مقاومة R0 على الضغط 46 N/mm^2 في حين مقاومة a-R50PZ كانت مساوية لـ 48.4 N/mm^2). وهذا أمر يجب أخذه بعين الاعتبار في حال تم استخدام الركام المعاد تدويره. أما مقاومة الشد ومعامل المرونة فكانت أخفض بنسبة 10%.
9. أبدت الجوائز الخاضعة للانعطاف لدونة أكبر كلما كانت نسبة الركام المعاد تدويره أعلى بسبب بنية الركام المعاد تدويره والتي تحوي نسبة فراغات أكبر تسمح بحصول تشوهات أعلى وبالتالي سهم أكبر في منتصف الجائز، حيث زاد السهم المتشكل عند الانهيار في R50. بنسبة 20% عن السهم الحاصل في R0 عند الانهيار.
10. إن الجوائز المحضرة مع بوزولانا بنسبة 15% كبديل عن وزن الاسمنت أعطت قيم للسهم عند بدء سيلان التسليح أقل بمقدار 10% بالمقارنة مع نظيراتها المحضرة فقط من اسمنت بورتلاندي ولكن قدرة التحمل بقيت نفسها في الحالتين.
11. لم تتأثر علاقة قوة- انتقال في الجوائز المحضرة من ركام معاد تدويره مع نسبة تسليح أقل من العظمى، حيث بينت الدراسة التجريبية والتحليلية أن القوة الأعظمية التي يتحملها الجائز كانت متقاربة جداً من أجل (R0, R50, R100) أي أنه تم الحصول على نفس المقاومة التي يعطيها استخدام الركام الطبيعي، وبالتالي بين هذا البحث إمكانية استخدام الـ RAC على العناصر المعرضة لانعطاف خاصة أن عدم تجاوز النسبة العظمى هو شرط تصميمي يجب تحقيقه في الكودات.
12. أظهرت الدراسة التحليلية على جوائز من خرسانة منتجة من ركام معاد تدويره أنه عندما يتم استخدام نسبة تسليح أكبر من العظمى فإن القوة الأعظمية التي يتحملها الجائز تنخفض حتى 12% من أجل 100% من الركام المعاد تدويره بالمقارنة مع القوة التي تتحملها جوائز بركام طبيعي، وهي ليست بالنسبة الكبيرة وهذه الحالة ليست تصميمية لأنها تؤدي إلى انهيار على الضغط.

13. تم في هذا البحث اقتراح علاقة لتحديد معامل المرونة لخرسانة منتجة من ركام معاد تدويره تتعلق بمقاومة الضغط والوزن الحجمي وأظهرت المقارنة مع النتائج التجريبية المدروسة والنتائج التجريبية لأبحاث أخرى إمكانية استخدامها للتنبؤ بقيمة معامل المرونة، حيث أعطت تقارباً أفضل من علاقات تم اقتراحها في دراسات مرجعية سابقة.

2.8 التوصيات:

Recommendations

- 1- تم في هذا البحث لاعتبارات عديدة اعتماد نفايات المخبر الخرسانية كمصدر للركام المعاد تدويره، نوصي في دراسات قادمة باستخدام نفايات خرسانية ناتجة عن هدم المباني القديمة أو من المكبات.
- 2- تم في هذا البحث دراسة أثر نسبة الركام المعاد تدويره على الخصائص الميكانيكية مع تثبيت باقي البارامترات، نوصي في دراسات قادمة بدراسة أثر بارامترات أخرى كنسبة الماء إلى الاسمنت، كمية الاسمنت، المدونات، العمر... الخ على الخصائص الميكانيكية للخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره.
- 3- تناول البحث دراسة أثر استخدام البوزولانا الطبيعية من تل شيحان في السويداء على الخصائص الميكانيكية للخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره ونسبة 15%، نوصي في دراسات قادمة أن يتم استخدام بوزولانا طبيعية من مصادر أخرى في سوريا وبنسب أعلى. كما نوصي بدراسة أثر أنواع أخرى من الإضافات كالألياف بأنواعها، الرماد البركاني، برادة الحديد... الخ.
- 4- اعتمد في هذا البحث على منحنيات نظرية في توصيف مادة الخرسانة المعاد تدويرها، نوصي في دراسات قادمة أن يتم إيجاد هذه المنحنيات تجريبياً واعتمادها بشكلها الدقيق في النمذجة.
- 5- تم في هذا البحث دراسة سلوك الجوائز تجريبياً وتحليلها على الانعطاف كمثال على العناصر الإنشائية من خرسانة منتجة من ركام معاد تدويره، نوصي في دراسات قادمة أن يتم دراسة سلوك الجوائز على أنواع أخرى من القوى المطبقة كالقص والقتل... الخ كما نوصي أن يتم تقييم أثر الركام المعاد تدويره على أنواع أخرى من العناصر الإنشائية كالبلاطات، والأعمدة ... الخ.
- 6- اقترح في هذا البحث علاقة لتحديد معامل المرونة للخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره بدون إضافات، نوصي في دراسات قادمة أن يتم إدخال عوامل تأخذ أثر الإضافات في حال استخدامها.

المراجع *References*

- ABAQUS (2012), *version 6.12-1. Dassault Systemes Simulia Corp., USA.*
- Abukersh, S., (2009). "**High Quality Recycled Aggregate Concrete**" Phd thesis, School of Engineering and the Built Environment, Edinburgh University, UK.
- ACI 318-08 (1992). "**Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary**", ACI Manual of Concrete Practice, Part 3, American Concrete Institute, Detroit, MI.
- Adnan S., Loon L., Abdoul Rhaman I., Saman H M., Soejoso M. (2007). "**Compressive strength of recycled aggregate to concrete with various percentage of recycled aggregate**", University Tun Hussein Onn, Malaysia, Available at: <http://eprints.uthm.edu.my/2029/> (Accessed: 03-August-2012).
- Ajdukiewicz A. B., Kliszczewicz, A. T. (2007). "**Comparative tests of beams and columns made of recycled aggregate concrete and natural aggregate concrete.**", Journal of Advanced Concrete Technology, V. 5, No. 2, pp. 259-273.
- Akbari Y. V., Arora N. K., Vakil M. D. (2011). "**Effect on recycled aggregate on concrete properties**", International Journal of Earth Sciences and Engineering, 4, 924-928.
- Arundeb G., Saro M., Somnath Gh., (2011). "**Direct compressive strength and elastic modulus of recycled aggregate concrete**", International journal of civil and structural engineering, 2(1), 292- 304.
- Bairagi N.K., Kishore R. (1993). "**Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates**". Resource Conservation and Recycling, 9, 109-126.
- Bhikshma V., Kishore R. (2010). "**Development Of Stress – Strain Curves For Recycled Aggregate Concrete**", Asian journal of civil engineering (building and housing), 11, 253-263.
- Borosnyo A., Balazs G. L. (2005). "**Models for flexural cracking in concrete: the state of the art**", Thomas Telford and fib, Structural Concrete, 6, 53-62.
- BS EN 1992-1 (2004) , Eurocode2 , "**Design of Concrete Structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings**", European committee for standardization CEN.

- BS EN 1992-1 (2004), "**Eurocode2, Design of Concrete Structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings**", European committee for standardization CEN.
- BS8110, (1985) "**Structural Use of Concrete, Part 1: Code of Practice for Design and Construction**", British Standards Institution (BSI), London.
- Cadamuro E., Corrado M., Carpinteri A. (2010). " **Size-scale effects on minimum flexural reinforcement in RC beams:application of the cohesive crack model**" Proceedings of FraMCoS-7, Korea Concrete Institute, Seoul, 207-215.
- CEB-FIP. (2010), "**Fib Bulletin 55: Model Code 2010, First complete draft – Volume 1**", The International Federation for Structural Concrete (fib), Switzerland.
- Corinaldesi V., (2011). "**Structural concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate: from investigation to design**", Hindawi Publishing Corporation Advances in Civil Engineering, Article ID 283984, 6 pages.
- Crawford H S., Cullum S. (2001). "**Market development study for recycled aggregate products**", Report to waste reduction advisory committee, Association of professional engineers, Alberta, Canada, 34 pages.
- Dabhade N., Chaudari S R., Gajbhaye A R. (2013). " **Effect of pozzolanic material on split tensile strength of recycle aggregate concrete**", International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT), 2(5), 476- 479.
- Dhir R., Paine K. (2007)."**Performance related approach to use of recycled aggregates**", Waste & Resources Action Programme, Project code: AGG/WRAP, Aggregates Research Programme, 1-74.
- Etxeberria M., Vázquez E., Marí, A., Barra M. (2007). " **Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process**", Cement and Concrete Research, 37, 735-742.
- Floros D., Ingason O.A. (2013). "**Modeling and simulation of reinforced concrete beams**", Master's thesis, Department of Applied Mechanics, Division of Solid Mechanics, Chalmers University of technology, Goteborg, Sweden.
- Gonzalez B., Martinez F. (2005). "**Recycled aggregate concrete: aggregate and mix properties**", Material of constructions, Spain, 55, 53-66. Available at: <http://materconstrucc.revistas.csic.es> (Accessed: 29-May-2012)
- Gonzalez B., Martinez F. (2008). "**Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume**", Building and Environment, 43, 429-437.
- Gonzalez B., Martinez F., Carro L. (2009). "**Design of recycled concrete under ultimate limit state by normal stresses**", 2nd International RILEM Conference on progress of recycling in the built of environmental, Sao Paulo, Brazil, 2-4 December, 275-285.

- Higuera C., Rea A., Flores N., Soberón G., Calderón A., González S., Sánchez A. (2011). **"Sulfate Attack and Reinforcement Corrosion in Concrete with Recycled Concrete Aggregates and Supplementary Cementing Materials"**, International Journal of Electrochemical Science, 6, 613 – 621.
- Ibrahim A., Salman W. (2009). **"Finite element analysis of reinforced concrete beams strengthened with CFRP in flexural"**, Diyala Journal of Engineering Sciences, Iraq, 2, 88-104.
- Ikegawa T, Saito H., Ohuchi H., Kitoh H., Tsunokake H. (2009). **"Flexural and Shear Failure Tests of Reinforced Concrete Beams with Low Grade Recycled Aggregate"**. Memoirs- faculty of engineering osaka city university, Japan, 50, 29-36.
- Jankowiak T., Lodygowski T. (2005). **"Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model"**, Poznan University of Technology, Institute of Structural Engineering, Poland, 6, 53–69.
- Katz A., (2003). **"Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete"**, Cement and Concrete Research, 33, 703-711.
- Khalaf F.M., Devenny A.S. (2002). **"New tests for porosity and water absorption of fired clay bricks"**, Journal of Materials in Civil Engineering, 14, 334-337.
- Kim Y., Sim J., Park CH. (2012). **"Mechanical properties of recycled aggregate concrete with deformed steel re-bar"**, Journal Marine Science and Technology, 20, 274-280.
- Koji S, (2005). **"The new century of concrete technologies"**, Department of safety system construction engineering. Kagawa University, Japan. Available at: <http://www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/newsletter/newsletter12/SAKAI.pdf> (Accessed: 26-August-2012).
- Konin A.; Kouaido D., (2011). **"Influence of cement content on recycled aggregates concrete"**, Modern Applied Science, 5, , 23-31.
- Kou SH. (2005) **"Reuse recycled aggregate in structural concrete"**, PhD thesis, Polytechnic University, Hong Kong.
- Kumutha R., Vijai, K. (2010) **"Strength of concrete incorporating aggregates recycled from demolition waste"**. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 5(5), 64-71.
- Levy S.M., Helene P. (2004). **"Durability of recycled aggregate concrete: A safe way to sustainable development"**, Cement and Concrete Research, 34(11), 1975-1980.
- Limbachiya M C., Koulouris A., Roberts J J., Fried A N. (2004). **"Performance Of Recycle Aggregate Concrete"**, International RILEM Conference on environment-

- conscious material and systems for sustainable development, Kingston University, UK, 127-136.
- Luís R. E., Jarallah H., Hameed B. (2013). "**Load-deflection behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets**", Journal of Engineering and Development, 17, 14-24.
- Luís R. E., Jorge C., Brito D. (2004). "**Criteria for the use of fine recycled concrete aggregates in concrete production**", International RILEM conference on Use of Recycled building materials in building and structures, Barcelona, Spain, 8-11 Nov, 1-9.
- Malešev M., Radonjanin V., Marinković, S, (2010). "**Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production**", Sustainability, 2, 1204-1225.
- Maruyama I., Sogo M., Sogabe T., Sato R., Kawai K. (2004). "**Flexural Properties Of Reinforced Recycled Concrete Beams**". In Internacional RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures, 315, Barcelona, Spain.
- Mazloom M., Ramezaniapour A., Brooks C. (2004). "**Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete**", Cement & Concrete Composites, 26, 347–357.
- Mcneil K., Kang TH. (2013). "**Recycled concrete aggregates: a review**". International Journal of Concrete Structures and Materials, 7, 61–69.
- Mukai T., Kikuchi M., Koizumi, H. (1988). "**Properties of concrete products containing recycled aggregate**". In Proc. Of 2nd Int. Symp. on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, 2, pp. 595-604.
- Murali G., Vivek C.M., Rajan G., Janani N. (2012). "**Experimental study on recycled aggregate concrete**", International Journal of Engineering Research and Applications, 2, 407-410.
- NSC. (2009). "**They've changed the density of concrete - or have they?**". Technical Report, Available at: <http://www.steelconstruction.org/component/documents/?task=downloadDocument&doc=52613&file=57903>. (Accessed: 14-April-2014).
- Oikonomou N., (2005). "**Recycled Concrete Aggregates**". Cement and Concrete Composites, 27, 315–318.
- Park S. (1999). "**Recycled Concrete Construction Rubble As Aggregate For New Concrete**", Building Research Association of New Zealand, 86, 1-20.
- Patil S., Ingle G., Sathe P. (2013). "**Recycled coarse aggregates**". International Journal of Advanced Technology in Civil Engineering, 2, 27-33.

- Paul S., (2011). "**Mechanical behavior and durability performance of concrete containing recycled concrete aggregate**", Master's Thesis, The Department Of Civil Engineering Of The University Of Stellenbosch, Stellenbosch, South Africa.
- Rahal Kh. (2007). "**Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate**". Building and Environment, 42, 407-415.
- Robotics. (2014). "**Concrete-Eating Robot Recycles Buildings**". Available at: <http://news.discovery.com/tech/robotics/concrete-eating-robot-recycles-buildings-140226.htm> (Accessed: 28-March-2014).
- Sato R., Maruyama I., Sogabe T., Sogo M. (2007) "**Flexural behavior of reinforced recycled concrete beams.**", Journal of Advanced Concrete Technology, 5(1), 43-61.
- Suyama H., Takasu K., Matsufuji Y. (2012). "**The strength properties of the concrete used eco-cement, fly ash and recycled aggregate**". Proc. Of 37th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, 29-31 August.
- Tam V.W, Gao X. F., Tam C.M. (2004). "**Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach**", Cement and Concrete Research, 35, 1195–1203.
- Tam V.W, Tam C.M., Le K. N. (2006). "**Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches**", Conservation and Recycling, 50, 82–101.
- Tam V.W, Wang K., Tam C.M. (2008). "**Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis**", Journal of Hazardous Materials, 152, 703–714.
- Tsoumani A., Barkoula N., Matikas T. (2012). "**Recycled aggregate as structural material**", Department of Materials Science and Engineering, University of Ioannina, Ioannina, Greece, Available at: http://conference2014.esymbiosis.eu/pdf/tsoumani_et_al.pdf (Accessed: 18-June-2014).
- VUT. (2009). "**Cement: chemical composition and hydration**". Available at: <http://elearning.vtu.ac.in/16/ENotes/ConcreteTechnology/Unit1-RVR/Unit1-L2-RVR.pdf> (Accessed: 1-July-2013).
- Vyas Ch., Bhatt D. (2013). "**Use of Recycled Coarse Aggregate in Concrete**", International journal of scientific research, 2, 70-74.
- Waleed, N., Canisius G. (2005). "**Project plan: investigation on the effects of recycled and secondary aggregates on the engineering properties of concrete**", Project code: DTI/WRAP, Aggregates Research Programme, September, 224-256.

Xiao J., LI J., Zhang Ch. (2005). "Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading", Cement and Concrete Research, 35, 1187-1194.

Yehia A. H., Rashwan M. M., Assaf K. A., Abd el Samee K. (2014). "Improvement of performance for RC beams made from recycled aggregate by using non-traditional admixture", International Journal of Civil, Architectural, Structural and Construction Engineering, 8, 639-644.

الرفاعي، إيهاب. (2010). "افتتاح مصنع الظفرة لتدوير مخلفات الهدم والبناء" الاتحاد، متوفر على: <http://www.alittihad.ae/details.php?id=27581&y=2010> (تاريخ الدخول 10 نيسان 2013).

الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت بالخرسانة المسلحة (2004)، الطبعة الثالثة، دمشق.

المستقبل. (2013). "مدير البلدية: خطة لإنشاء 3 مصانع جديدة لإدارة وتدوير النفايات". متوفر على: <http://www.almustagbal.com/archives/244433> (تاريخ الدخول 23 آذار 2013)

جاروشة، ياسر. (2013). "خبراء: 26 مليون طن من النفايات الصلبة تنتجها دول الخليج سنوياً" الرياض، متوفر على: <http://www.alriyadh.com/2013/03/23/article819882.html> (تاريخ الدخول 13 نيسان 2013).

دي برس. (2009). "الإسمنت البوزولاني جديد المؤسسة العامة للإسمنت" متوفر على: <http://www.dp-news.com/pages/detail.aspx?articleid=11451> (تاريخ الدخول 15 أيلول 2012).

رفاعي، أمجد. (2004). "تحسين مواصفات الببتون باستخدام البوزولانا الطبيعية المحلية" إطروحة ماجستير، جامعة دمشق.

سيرياستيبس. (2011). "النفايات في سورية تعاني سوء المعالجة" متوفر على: <http://www.syriasteps.com/?d=144&id=75493> (تاريخ الدخول 3 أيار 2014).

كزبري، ريم. (2004). "الدراسة التجريبية التحليلية لعلاقة إجهاد تشوه للببتون المحلي" إطروحة ماجستير، جامعة دمشق.

محمد، عبد الوكيل. (2011). "«المقاولون العرب» تدرس شراء مخلفات الهدم لتدويرها و«المحافظة» ترصد مكافآت لضبط من يلقيها بالشوارع". مصرس، متوفر على: <http://www.masress.com/rosaday/124398> (تاريخ الدخول 3 آذار 2013).

مركز البيئة للمدن العربية. (2013). "إدارة النفايات في دبي". متوفر على: <http://www.ecat.ae/ar/static/34.aspx> (تاريخ الدخول 1 نيسان 2013).

Abstract

Concrete is undoubtedly a leading construction material for more than a century. However, the large-scale consumption of natural aggregate and the increased amounts of concrete and demolition waste going to landfill sites are causing significant damage to the environment. A major challenge for our society is the protection of the environment. Some of the important objectives to address this challenge are the reduction in the consumption of natural raw materials, as well as the increase in consumption of waste materials. Many advanced countries have already developed their sustainable programs to meet these objectives.

Recycling concrete is a feasible option to decrease the demand on high quality natural resources and to decrease the amount of waste that is disposed in landfills. Recycled concrete has been primarily used for non-structural purposes. The use of recycled concrete in load bearing structures has not yet gained wide acceptance despite of the research findings that suggest the possibility of using recycled aggregate concrete (RAC) in structural elements when additives such as pozzolanic materials are used to improve concrete fresh and hardened material properties.

In this research an experimental study was conducted to evaluate the influence of the recycled aggregate on the mechanical properties of RAC. The investigated properties are the compressive strength, the splitting strength and the elastic modulus. The ultimate load of reinforced concrete beams was also determined. In the study, the natural aggregate was replaced by several ratios of recycled aggregate which are (0%, 50%, 75%, 100%). 15% of natural pozzolana by the cement weight was used whether it was as a replacement of the cement or as an addition to the mix.

The study shows that the mechanical properties decrease while the recycled aggregates increase. The use of 15% of pozzolana as an additive with 50% of RA gives an improvement in the compressive strength to extent it reaches the compressive strength of the natural aggregate concrete especially in the age of 120 days. The study also suggests an equation for predicting the elastic modulus for RAC. The equation output was calibrated against the experimental values.

In this study, reinforced beams were tested under four-point loading. The test findings indicate that the percentage of RA doesn't influence the ultimate load of reinforced beam subjected to flexure when the reinforcement ratio doesn't exceed the maximum limit.

After the experimental study was completed, a numerical model to simulate the tested beams was established based on Finite Element Method and Non- Linear Analysis. The numerical model output was calibrated against the experimental results so that the model can be extended in the future to study various beam dimensions and reinforcement ratios.

Syrian Arab Republic
Damascus University
Faculty of Civil Engineering



**” Study of The Mechanical Properties of Recycled Aggregate
Concrete”**

Thesis Submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of
Philosophy in Structural Engineering

By

Tamador Hani Mokbel

Supervisor

Dr. Kassem Al-Zouhyli

Damascus 2014