عامل مرونة الخرسانة المنتجة من الحصويات المعاد تدويرها وتأثير البوزولانا الطبيعية على قيمته

د.م. قاسم علي الزحيلي*

(الإيداع: 17 حزيران 2019 ، القبول 14 حزيران 2020)

الملخص:

في هذا البحث أجريت دراسة تجريبية على الخرسانة المنتجة من الركام المعاد تدويره لتقييم العديد من الخواص الميكانيكية وخاصة دراسة معامل المرونة.تم استبدال الحصوياتالطبيعية بحصويات معاد تدويرها بنسب **(0% ,50% ,75%,100%).**و أجريت تجارب على ثلاث حالات. الحالة الأولى: عدم إضافة أو استبدال كمية الاسمنت بالبوزولانا الطبيعية.الحالة الثانية: استبدال ما يعادل 15% من وزن الإسمنتبمادة البوزولانا الطبيعية على الخلطة الخرسانية. الحالة الثالثة: إضافة ما يعادل 15% من وزن الإسمنت من مادة البوزولانا الطبيعية على الخلطة الخرسانية.تم التوصل إلى النتائج التالية:

- **أن قيمة معامل المرونة يتناسب عكسا مع قيمة الاستبدال للحصويات المعاد تدويرها.**
- **أن إضافة 15% من مادة البوزولانا الطبيعية على الخلطة مع نسبة استبدال 50% حسن كل من مقاومة الضغط ومعاملالمرونة وخاصة في العمر 120 يوما. حيث أعطت مقاومات تقدر بـــ 97%، 103% من مقاومة الخرسانة بركام طبيعي في اليوم 28 و120 على الترتيب.**

الكلمات المفتاحية: الركام المعاد تدويره، البوزولانا الطبيعية، عامل مرونة الخرسانة.

* أستاذ مساعد متقاعد من جامعة دمشق، كلية الهندسة المدنية، قسم الهندسة الإنشائية.

Elastic Modulus ofthe Recycled Aggregate Concreteandthe Effect ofthe NaturalPozzolana

Associate prof: kassem alzouhayli*

(Received: 17 June 2019, Accepted: 14 June 2020)

Abstract:

Resesearch and experimental study have been conducted to evaluate the influence of the recycled aggregates on the several mechanical properties ofrecyclied aggregate concrete(RAC), specially studying the elastic modulas. Natural aggregates were replaced by several ratios of recycled aggregates (0%, 50%, 75%, and 100%).Three cases were tested. The first case,the cement is not added or replaced by natural pozzolana. The second case, 15% of cement's weight is replaced by natural pozzolana. The third one,adding the natural Pozzolana which is equal to 15% of cement's weight.The studyfinidings showed that the modulus of elasticity decreases as the recycled aggregates increase. In addition, using of 15% of pozzolana as an additive with 50% of recyclied aggregate (RA)showed an improvement incompressione strength and modulus of elasticity, especially at the age of 120 days. Whereas, the recycled aggregate concrete strength was approximately equal to 97% and 103% of the natural aggregate concrete in both 28 and 120 days respectively.

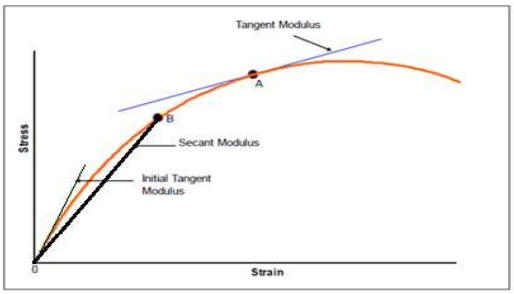
Key words: recyclied aggregate, natural pozzolana, modulud of elasticity.

* Associate Prof (now retired), Damascus University, Faculty of Civil Engineering, Structural Engineering Department.

1- مقدمة:

يعتبر استخدام الحصويات الناتجة عن الخرسانة المعاد تدويرها خيارا هاما ليس فقط لترشيد اسخدام الحصويات الطبيعية بل للتخلص من مخلفات الهدم التي تدفن في المكبات.على الرغم من ان الابحاث التي أجريت والتي توصلت الى إمكانية استخدام الخرسانة المعاد تدويرها مع بعض الاضافات، فإن انتشارها لا يزال محدودا للاعمال الانشائية.إن لمعامل المرونة في الخرسانة قيما متغيرة تبعاً لدرجة التحميل ويتم التمييز بين عدة قيم لمعامل المرونة وفق المعايير التالية (الشكل1):

- معامل المرونة المرن المماسي الأولي وذلك عند بدء التحميل.
- 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 رقم (1): يوضح معاملات المرونة الثلاث.

2- هدف البحث:

يهدف البحث إلى تقييم معامل المرونة من أجل الخرسانة المنتجة من الركام المعاد تدويره وأثر ابوزولانا على قيمته.

3- مواد وطرق البحث:

يتغير معامل المرونة لمادة الخرسانة تبعاً لتغير المواد الأولية الداخلة في تركيب الخلطة الخرسانية. لتحديد تأثير الركام المعاد تدويره على معامل المرونة تم إجراء تجارب في مخبر كلية الهندسة المدنية على مواشير أبعادها 100x100x300مم. بحسب ما تشترطه المواصفة ASTM C 469

توصي أغلب المواصفات العالمية باستخدام عينات أسطوانية 100x300مم لتحديد معامل المرونة. بسبب عدم توفر الأجهزة اللازمة لإجراء الاختبار تم الاستعاضة عن الاسطوانة بموشور، وهذا الأمر تم اعتماده من قبل عدد من الدراسات نذكر منها Abukersh (2009)[1] 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 كما في الشكل 2.

الشكل رقم (2):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، تلى ذلك تثبيت ساعات قياس التشوه وهي بدقة 0.01 مم، قبل وضع العينة بين فكيه والبدء بالتحميل تم ضبط الساعات جميعاً عند الصفر (الشكل3).

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 $6Kg/cm^2/sec$، ومن ثم تم البدء بأخذ قراءات الحمل مع التشوه.

الشكل رقم (3): اختبار معامل المرونة في هذه الدراسة.

تم تحضير ثلاث مجموعات من الخلطات:

- المجموعة الأولى: تم في هذه المجموعة 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 (التي تم الحصول عليها من تل شيحان في السويداء) كإضافة على الخلطة بنسبة 15% من وزنالاسمنت المستخدم.

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

يبين الجدول 1 ترميز الخلطات المعتمدة في البحث.

الجدول رقم (1): ترميز الخلطات المعتمدة في البحث

رمز المجموعة	SI	SII	SIII
نسبة RA%	البوزولانا كنسبة من وزن الاسمنت الأساسي		
	0	15%	15%
0	R0	r-R0PZ	a-R0PZ
50	R50	r-R50PZ	a-R50PZ
75	R75	r-R75PZ	a-R75PZ
100	R100	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:

- تم اعتماد النتائج التي توصلت لها بعض الدراسات المرجعية والتي تؤكد بأن هذه النسبة (2009) Abukersh[1]تعتبر المثلى عندما يراد استبدال الاسمنت البوورتلاندي بالبوزولانا في الخرسانة التقليدية بحيث لا تنخفض المقاومة على الضغط.
- وجود عدة معامل في سوريا تصنع اسمنت بورتلاندي بوزولاني بنفس النسبة وبالتالي من السهل استخدامها على أرض الواقع مثل معمل حماة ومعامل لافارج.

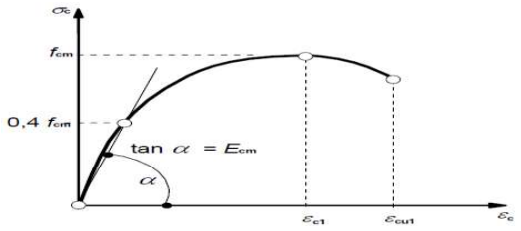
تم اعتماد الطريقة الأمريكية[2]لتصميم الخلطات الخرسانية جميعها بمقاومة اسطوانية مطلوبة مقدارها $29.2\ N/mm^2$. مع نسبة w/c=0.55.يوضحالجدول 2 مكونات الخلطات من أجل المجموعات الثلاثة SI و SII و SIII

الجدول رقم (2): مكونات الخلطات للمجموعات المعتمدة في البحث

المجموعة	RA%	مكونات الخلطة كغ/م³						
		الماء	الاسمنت	البوزولانا	الرمل	البحص الطبيعي	البحص المعاد تدويره	الوزن الحجمي
SI	0	193	350	0	964	868	0	2414
	50	193	350	0	959	436	410	2366
	75	193	350	0	958	219	617.2	2341
	100	193	350	0	957	0	826	2334
SII	0	193	297.5	52.5	959	868	0	2410
	50	193	297.5	52.5	957	436	410	2359
	75	193	297.5	52.5	953	219	617.2	2335
	100	193	297.5	52.5	952	0	826	2330
SIII	0	193	350	52.5	914	868	0	2420
	50	193	350	52.5	908	436	410	2374
	75	193	350	52.5	906	219	617.2	2352
	100	193	350	52.5	906	0	826	2340

الجدير بالذكر أنه تم استخدام ملدن عالي الآداء، خافض للماء، موافق للمواصفة ASTM C-494-Type B، يدخل في تركيبه نفثالين فورمالدهيد (Naphthaline Formaldehyde) و لجنوسلفونيت (lignosulphonate) كثافته $1.2\ Kg/m^3$ خالي من الكلور (chloride free).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.

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 في الكود الأوروبي (Eurocode, 2004)[3]، حيث f'_{cm}هي المقاومة المتوسطة الاعظمية على الضغط والذي تم تحديدها مسبقا من خلال كسر ثلاثة مواشير لكل خلطة وأخذ الوسطي لهم. يبين الشكل **4** منحني إجهاد تشوه حسب الكود الأوروبي (Eurocode, 2004)



الشكل رقم (4): منحني إجهاد تشوه حسب الكود الأوروبي (Eurocode, 2004) [3] .

تم تسجيل التشوه المقابل لكل زيادة في الحمل مقدارها 1 طن، كما تم حساب إجهاد الضغط بتقسيم الحمل على مساحة المقطع، وعند اجهاد مقداره 0.4fc تم تحديد معامل المرونة القاطع Ecوفق العلاقة: $E_c = \frac{0.4 f_c}{\varepsilon_c}$

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

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta L}{L}$$

حيث Lالبعد بين النقطتين التي يحسب بينهما التشوه، ΔL التشوه المقابل لإجهاد مقداره 0.4fc.

4- النتائج ومناقشتها:

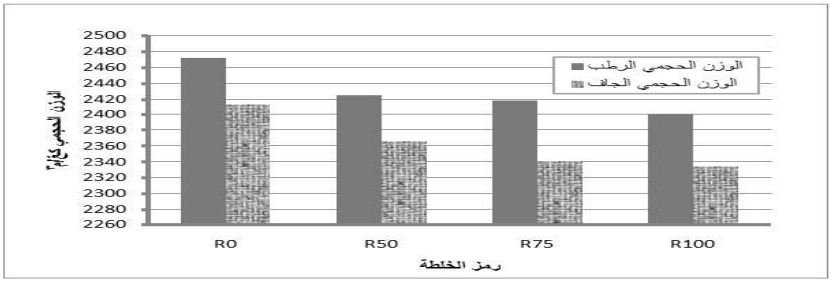
4-1 الوزن الحجميThe density:

تم تحديد قيم الأوزان الحجمية لخلطات المجموعة SI وفق المواصفة ASTM C 138وإدراجها في الجدول 3 وهي بالحالة الرطبة بعد الصب مباشرة، وكذلك الوزن الحجمي الجاف عند اليوم 28 . حيث كل قيمة هي وسطي ثلاثة قيم.يوضح الشكل 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 حجمياً قدره 2400 Kg/m^3، أي أن الانخفاض الحاصل كان بمقدار 3%. انخفض الوزن الحجمي الجاف أيضا بنسبة 3% عند استخدام الركام المعاد تدويره بنسبة 100% أيضا، من أجل R0 كان 2414 Kg/m^3 ومن أجلR100 كان2334 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[4]) (M C. ,2004يلاحظ من مقارنة الوزن الحجمي الرطب والجاف لأي خلطة بأن الفارق لم يتجاوز 100 kg/m^3وهذا موافق

لما أكدت عليه معظم **الدراسات من أن الوزن الرطب يمكن حسابه بطرق مبسطة من خلال إضافة 100 Kg/m^3 للوزن الحجمي الجاف(NSC, 2009)[5].**

الجدول رقم (3): قيم الأوزان الحجمية لخلطات المجموعة SI

الخلطة	الوزن الحجميالرطب (Kg/m3)	الوزن الحجمي الجاف (Kg/m3)
R0	2472	2414
R50	2425	2366
R75	2419	2341
R100	2400	2334



الشكل رقم(5): الوزن الحجمي بحالتيه الرطبة والجافة

تم استبعاد الركام الناعم و الحصول على ركام خشن بثلاث مقاسات أسمية وهي 25مم، 19مم و12مم كما يوضح الشكل (6)، وتم أخذ النسب 35%، 35% و30%على التتالي للحصول على خليط يحقق المواصفة ASTM C33 .

الشكل رقم (6): الكسارة المستخدمة وناتج فرز الركام الخشن المعاد تدويره

لم يتم حتى الآن وضع مواصفات لتحديد خواص الركام المعاد تدويره، لذلك اعتمدت معظم الدراسات المواصفات المستخدمة بحالة الركام الطبيعي نفســـها 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) الخواص التي تم إيجادها من أجل RA وكذلك المواصفات المتبعة لتحديديها.

الجدول رقم(4): خواص الركام الخشن المعاد تدويره المستخدم في البحث

الخصائص	مقاس المنخل بـ مم	النسبة المئوية للمار الكلي RA				حدود المواصفة ASTM C33	
		ركام 1 35%	ركام 2 35%	ركام 3 30%	الخليط	الحد الادنى	الحد الأعلى
التحليل الحبي	37.50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	25.00	89.10	100.00	100.00	96.19	90.00	100.00
	19.00	60.64	99.36	100.00	86.00	60.00	80.00
	12.50	0.90	9.90	100.00	33.78	25.00	60.00
	9.50	0.10	0.14	95.40	28.70	12.00	35.00
	4.75	0.10	0.14	7.35	2.29	0.00	10.00
	2.36	0.10	0.94	0.00	0.00	0.00	5.00
الوزن النوعي	الجاف	2.41	2.40	2.36	2.39	حسب المواصفة ASTM C127	
	الجاف مشبع السطح	2.52	2.53	2.49	2.51		
	الظاهري	2.72	2.74	2.72	2.73		
الامتصاص%		4.79	5.18	5.52	5.15		
الوزن الحجمي Kg/m^3		-	-	-	1270.00		
الفاقد بالاهتراء%		-	-	-	32,42	حسب المواصفة AASHTO T 96 –77	

مقارنة بين خواص الركام الخشن الطبيعي والمعاد تدويره: comparision between NA & RA

يوضح الجدول (**5**) قيم بعض البارامترات للركام الطبيعي والركام المعاد تدويره المستخدمين، وبالمقارنة يتبيّن ما يلي:

- فيما يخص الكثافة (الوزن النوعي) فإن كثافة الركام المعاد تدويره أقل من كثافة الركام الطبيعي وهذا يتوافق مع ما توصلت إليه الدراسات .
- 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 من الركام الطبيعي وهذا يتوافق مع ما جاءت به دراسة (Limbachiya et al, 2004).

- أيضا نتائج الاهتراء تنسجم مع نتائج الدراسة المرجعية التي أوضحت أن مقاومة RA للصدم أقل من NA بسبب المونة الضعيفة الملتصقة به والتي تتفتت بشكل أسهل وبالتالي تعطي فاقد أكبر. حيث الفاقد بحسب اختبار لوس انجلوس على الركام الخشن بنوعيه RAوNA كان على التتالي 32,42% و 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 رقم (5): 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/ms)	1335	1270
الاهتراء (%)	19	32.42

4-2مقاومة الضغط:**Compressive Strength**

يوضح الجدول (**6**) قيم مقاومات الضغط عند الأعمار المدروسة من أجل النسب الأربعة من RA للمجموعة SI، حيث كل قيمة هي وسطي ثلاث قيم.

الجدول رقم (6): قيم مقاومات الضغط عند الأعمار المدروسة من أجل النسب الأربعة من RA

رمز الخلطة	نسبة RA%	مقاومة الضغط للمجموعة الأولى (N/mm2)			
		اليوم			
		7	28	56	120
R0	0	27.6	37.1	40.5	45.9
R50	50	24.6	34.0	37.1	42.0
R75	75	22.1	31.9	36.3	38.2
R100	100	23.0	32.0	36.1	38.2

4-3 معامل المرونة للمجموعة **SI** (**Elastic Modulus for SI**): يوضّح الجدول7 قيم معامل المرونة للمجموعة SI في اليومين 28 و120، حيث كل قيمة هي وسطي ثلاث قيم. من الملاحظ زيادة انخفاض معامل المرونة كلما زادت نسبة RA المستخدم في الخلطة وذلك في كلا العمرين المدروسين.

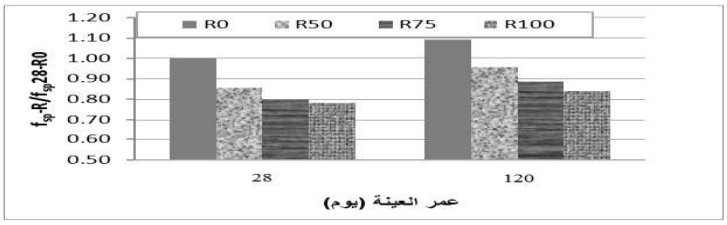
الجدول رقم (7): قيم معامل المرونة للمجموعة SI

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

تم في الشكل 7 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، 24% 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 الـRA[6](Xiao et al,2005).

في اليوم 120 أبدى معامل المرونة تحسّنا في قيمه عند المقارنة مع القيم التي وصل لها في اليوم 28 وذلك من أجل جميع نسب RA في هذه المجموعة، فقد 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 إماهة الاسمنت الغير متفاعل مع الماء المحتجز ضمن مساماته الأمر الذي يعطي صلابة أكبر للبناء الداخلي للخرسانة.



الشكل رقم (7): قيم معامل المرونة لخلطات المجموعة SI منسوبة إلى معامل المرونة لـ R0

4- 4معامل المرونة للمجموعة **Elastic Modulus of SII(SII)**: يوضح الجدول 8قيم معامل المرونة للمجموعة SII في اليومين 28 و120، 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.

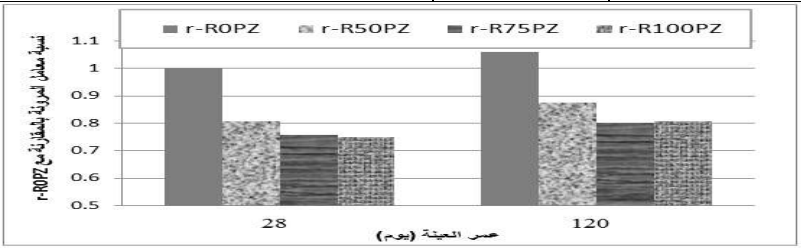
الجدول رقم (8): قيم معامل المرونة للمجموعة SII في اليومين 28 و120

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

تم في الشكل 7 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% فيr–R100PZ، 24% من أجل r–R75PZ، وبمقدار 19% عند r–R50PZ. وبما أن مقاومة الضغط تحسّنت مع الزمن فإن معامل المرونة تحسّن أيضاً عند اليوم 120 بمقدار 5%– 7% عن القيم التي حققها في اليوم 28. يبين الجدول 9 نسبة تغير قيمة معامل المرونة بتغير نسبة الحصويات المعاد تدويرها للمجموعة SII في اليومين 28 و120.

الجدول رقم (9): نسبة تغير قيمة معامل المرونة بتغير نسبة الحصويات المعاد تدويرهاللمجموعة SII في اليومين 28 و120

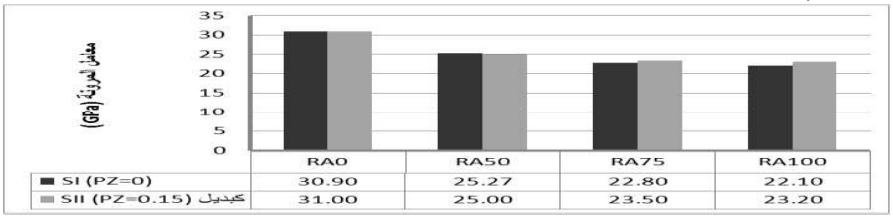
	عمر 28 يوم %	عمر 120 يوم %
$\frac{(r-R0PZ)-(r-R100PZ)}{r-R0PZ}$	0.25	0.24
$\frac{(r-R0PZ)-(r-R75PZ)}{r-R0PZ}$	0.25	0.246
$\frac{(r-R0PZ)-(r-R50PZ)}{r-R0PZ}$	0.19	0.176



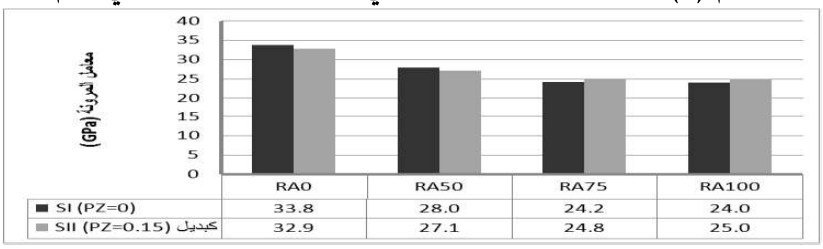
الشكل 7 – قيم معامل المرونة لخلطات المجموعة SII منسوبة إلى معامل المرونة لـ r–R0PZ .

يوضح الشكلان 9 و10 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 SII سواء في اليوم 28 أو في اليوم 120، وهذا ما توصل له أيضاً (Suyama et al, 2012)[7]عندما درس أثر الرماد البركاني على الضغط

وعلى معامل المرونة، حيث بينت هذه الدراسة أن المواد البوزولانية حسّنت مقاومة الضغط ولكن لم يكن لها تأثير ملحوظ على معامل المرونة وإنما المؤثر الأكبر كان نسبة الركام المعاد تدويره.



الشكل رقم (9): مقارنة بين معامل المرونة في المجموعتين SI و SII في اليوم 28



الشكل رقم (10): مقارنة بين معامل المرونة في المجموعتين SI و SII في اليوم 120

5-4 معامل المرونة للمجموعةSIII (Elastic modulus of SIII):

يوضح الجدول 10 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 SIوSII فإن معامل المرونة كان الأكثر تأثرا بوجود الركام المعاد تدويره. يوضح الجدول 11 نسبة تغير قيمة معامل المرونة بتغير نسبة الحصويات المعاد تدويرها للمجموعة SIII في اليومين 28 و120.

الجدول رقم (10): قيم معامل المرونة للمجموعة SIII في اليومين 28 و120.

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

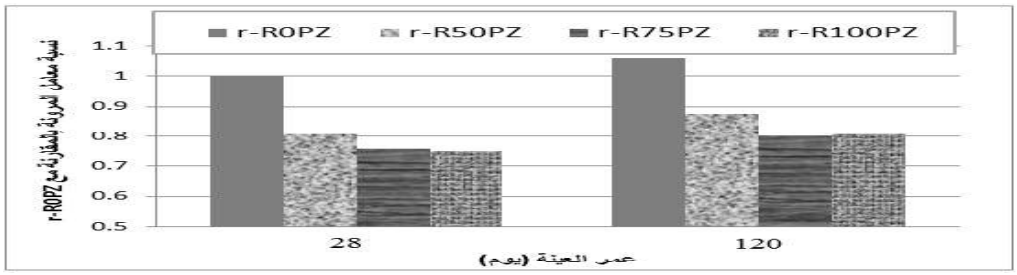
الجدول رقم (11): نسبة تغير قيمة معامل المرونة بتغير نسبة الحصويات المعاد تدويرها للمجموعة SIII في اليومين 28 و120.

	عمر 28 يوم (%)	عمر 120 يوم (%)
$\frac{(a-R0PZ)-(a-R100PZ)}{a-R0PZ}$	0.318	0.29
$\frac{(a-R0PZ)-(a-R75PZ)}{a-R0PZ}$	0.29	0.27
$\frac{(a-R0PZ)-(a-R50PZ)}{a-R0PZ}$	0.2	0.16

يوضح الشكل 11نسبة 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–R075PZ، a–R100PZ على الترتيب، ويلاحظ بأن الفارق في معامل 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.

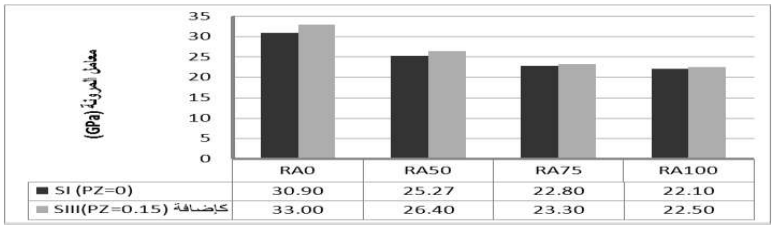
مع التقدم بالعمر عند 120 يوم، تحسّن معامل المرونة من أجل جميع الخلطات عن اليوم 28، وكانت نسبة التحسّن الأكبر في a–R50PZ وهي 14%، أما مع a–R0PZ فكان التحسّن 8%. في حين أنها من أجل a–R75PZ وa–R100PZ كانت 12% وهذا ينسجم مع ما تم لحظه في مقاومة الضغط حيث كان التحسّن الأكبر مع الزمن في a–R50PZ وهو

34%، أما في a–R75PZ وa–R100PZ 32% و 30% على الترتيب وأخيرا فيa–R0PZ كان التحسن هو الأدنى 25% وذلك بالمقارنة مع مقاومات الضغط للخلطة عند اليوم 28.

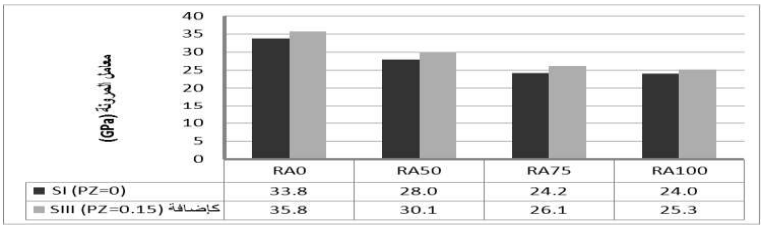


الشكل رقم (11) :نسبة معامل المرونة لخلطات المجموعة SIII بالمقارنة مع معامل المرونة لـ –R0PZaفي اليوم 28

يوضح الشكلان 12 و13مقارنة بين معامل المرونة في المجموعتين SI و SIII في اليوم 28 واليوم 120 على الترتيب من أجل النسب الأربعة للركام المعاد تدويره المعتمدة في البحث.



الشكل رقم (12) : مقارنة بين معامل المرونة في المجموعتين SI وSIII في اليوم 28



الشكل رقم (13) : مقارنة بين معامل المرونة في المجموعتين SI و SIII في اليوم 120

يظهر من الشكل 12 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 12 فبقيت نسبة التحسن 6% في RA0 وارتفعت إلى 8% في RA50 وRA75. أما من أجل RA100 فإن إضافة البوزولانا في SIII جعل معامل المرونة في اليوم 120 أعلى بـ 5% مما هو عليه في SI.

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 أتمت 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 [7](Suyama et al, 2012), [8](Gonzalez & Martinez, 2008)

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 a–R50PZ نسبة 85% من R0 في اليوم 28، ونسبة 91% في اليوم 120.

5– الاستنتاجات:

- 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.
- 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 تحسّن في الخصائص من أجل نفس نسبة الركام المعاد تدويره مع التقدم بالعمر.
- 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–R100PZ كانت المقاومة للضغط$39.9N/mm^2$.
- أعطى استخدام خليط من الركام المعاد تدويره والركام الطبيعي بنسبة 50% مع إضافة البوزولانا على الخلطة بنسبة 15% مقاومة ضغط قريبة جدا وأحياناً 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$36N/mm^2$. 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%.

6– التوصيات:

- قادمة باستخدام هدميات خرسانية ناتجة عن هدم المباني القديمة أو من المكبات كمصدر للركام المعاد تدويره.
- 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.

7–المراجع:

[1] Abukersh, S., (2009). "High Quality Recycled Aggregate Concrete" Phd thesis, School of Engineering and the Built Environment, Edinburgh.

[2] ACI 318-08 (1992). "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary", ACI Manual of Concrete Practice.

[3] BS EN 1992-1 (2004), "Eurocode2, Design of Concrete Structures, European committee for standardization CEN.

[4] Limbachiya M C., Koulouris A., Roberts J J., Fried A N. (2004). "Performance of Recycle Aggregate Concrete".

[5] 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.

[6] Xiao J., LI J., Zhang Ch. (2005). "Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading", Cement and Concrete.

[7] Suyama H., Takasu K., Matsufuji Y. (2012). "The strength properties of the concrete used eco-cement, fly ash and recycled aggregate".

[8] Gonzalez B., Martinez F. (2008). "Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume", Building and Environment, 43, 429-437.