استثمار مواد إعادة التدوير الإنشائية في المجبول الإسفلتي الخاص بطبقات التغطية الطرقية

إعداد:

المهندس ثائر نزار ناصيف

الملخص

أجمعت الدراسات على أن الحصويات المعاد تدويرها (**R**ecycled **C**oncrete **A**ggregates **RCA**) هي المواد الناتجة عن هدم الكتل البيتونية المسلحة (بعد نزع حديد التسليح)، وغير المسلحة حيث يتم تكسيرها إلى مقاسات أصغر تحقق متطلبات التدرج المعتمدة في المواصفات القياسية ضمن مجال الاستخدام. يتم استخدام الحصويات المعاد تدويرها RCA ضمن مجالات عديدة منها طبقات التأسيس والخلطات البيتونية والردميات الترابية. في هذه الدراسة نسلط الضوء على إمكانية استخدام الحصويات المعاد تدويرها من مخلفات هدم المباني (المخلفات البيتونية المنشأ) في تصميم الخلطات الإسفلتية الساخنة HMA والخاصة بمتطلبات طبقة التغطية (الاهتراء) الإسفلتية، بعد تعديلها بالحصويات الطبيعية، بهدف إيجاد طريقة فعالة لتقليص الكميات المتزايدة من نفايات الهدم في سورية، والحد من الطلب المتزايد على الحصويات الطبيعية؛ من خلال القيام بعمل مخبري تضمن تحديد مواصفات الحصويات المعاد تدويرها والحصويات الطبيعية،

ومن ثم تصميم خلائط إسفلتية ساخنة بنسب مختلفة /0، 25، 50، 60 %/ من الحصويات المعاد تدويرها، وتحديد النسبة المثالية للإسفلت عبر تحديد خواص الخلائط المصممة وهي الكثافة والثبات والانسياب وكل من الفراغات الهوائية والمليئة.

بينت النتائج ازدياد نسبة الإسفلت المثالية في الخلائط التصميمة مع زيادة نسبة استخدام الحصويات المعاد تدويرها في الخلائط الإسفلتية، وانخفاض ثبات الخلائط الإسفلتية المصممة بنسب من الحصويات المعاد تدويرها عن ثبات الخلطة المرجعية، كما نقصت نسبة الفراغات الهوائية. حققت الخلائط الإسفلتية المصممة وفق طريقة مارشال تحسناً بخصائص المجبول مع تزايد نسبة الحصويات المعاد تدويرها حتى النسبة /50% RCA/ ضمن الشروط والمواصفات المعمول بها في سورية، ثم انخفضت الخصائص الحجمية مع تزايد نسبة استخدام الحصويات المعاد تدويرها بعد هذه النسبة.

الكلمات المفتاحية: الإسفلت، خلطة إسفلتية، الحصويات المعاد تدويرها، ثبات مارشال.

قائمة بالاختبارات المعتمدة في البحث وفق مواصفات ASTM و AASHTO

نوع الاختبار	رقم المواصفة	
	ASTM	AASHTO
اختبار لوس انجلوس للحصويات	C 131	T 96
التحليل الحبي للحصويات	C 136	T 27
الوزن النوعي للحصويات الخشنة	C 127	T 85
الوزن النوعي للحصويات الناعمة	C 128	T 84
اختبار المكافئ الرملي للحصويات	D 2419	T 176
اختبار الغرز	D 5	T 49
اللزوجة المطلقة	D 2171	T 202
اللزوجة الكينماتيكية	D 2170	T 201
درجة الوميض	D 92	T 48
درجة التمييع	D 36	T 51
اختبار الطبقة الرقيقة	D 1754	T 179
درجة الاستطالة	D 113	T 51
الوزن النوعي للإسفلت	D 70	T 228
اختبار مارشال	D 6927	T 245
إعداد عينات مارشال	D 6926	T 245

مقدمة الدراسة

١-١- مقدمة عامة:

تعدُّ الهندسة المدنية أحد أكثر العلوم اهتماماً بحماية البيئة والمصادر الطبيعية، إضافة إلى كونها أحد العلوم الرئيسة التي تهدف إلى نشر وتعميم فكرة الاستدامة، بالتالي يجب على جميع العاملين في هذا المجال القيام بدراسات جدية من أجل ابتكار مواد وبدائل جديدة تعادل أو تضاهي _من حيث الكفاءة_ المواد التقليدية التي نستمر باستخدامها حتى اليوم والتي تستهلك بدورها كميات هائلة من المصادر الطبيعية الموجودة والتي تنضب يوماً بعد يوم.

إن استعمال الحصويات الطبيعية نواتج كسارات المقالع في تزايد ملحوظ مع التطور المستمر والمتزايد في تشييد البنى التحتية والمنشآت الهندسية، لذلك وجب البحث عن آفاق جديدة مثل استثمار نواتج أنقاض الأبنية وإعادة تدوير نفاياتها. عملية إعادة التدوير كما وردت في أحد الأبحاث البريطانية هي "عمليات معالجة لمواد مستعملة مسبقاً من أجل تصنيع منتج جديد". تتضمن فوائد عمليات إعادة التدوير:

- ❖ فائدة اقتصادية (توفير في الكلفة).
- ❖ فائدة بيئية (حماية البيئة).
- ❖ الاستمرارية (إطالة أمد الحصويات الطبيعية وتخفيض عدد مطامر نفايات الهدم).
- ❖ مجالات واسعة للاستخدام (تستعمل في الأرصفة، الجسور، الأعمال الطرقية....).

وبالتالي هناك ضرورة للبحث عن آلياتٍ وطرقٍ معينة جديدة للاستفادة من المواد المعاد تدويرها والتي أصبحت تنتَجُ بكمياتٍ كبيرةٍ سنوياً، والبحث في إمكانية استخدامها في إنتاج الخلطات الإسفلتية الساخنة، وبالتالي حماية الموارد الطبيعية غير المتجددة (مقالع، شواطئ...) والمساهمة في إطالة أمد المصادر الطبيعية للحصويات.

١ – ٢ –إشكالية الدراسة:

إعادة استخدام مخلفات البناء ونواتج الهدم من الأهداف التي سعى المهندس المدني إلى تحقيقها منذ زمن بعيد، فقد ألزم التطور الصناعي والعمراني الذي شهده عالمنا على البحث عن منهجيات علمية للاستفادة من الكميات الهائلة التي تنتج سنوياً من نفايات الهدم والإنشاء بغية وضع أسس واستراتيجيات ثابتة لمعالجة هذه النفايات وتحويلها إلى حصويات تؤمن ديمومة واستمرارية أكبر وأطول لمصادر الحصويات الطبيعية (غير المتجددة) والتي باتت تعاني مؤخراً من أزمات حادة ونضوب في الإمكانيات لأسباب عديدة يأتي في مقدمتها الاستخدام الجائر للمواد، الأمر الذي حث الباحثين على المضي قدماً للاستفادة من مختلف النفايات البيتونية وتحويلها إلى مواد يمكن الاستفادة منها بدلاً من أن تكون السبب في العديد من المشاكل على مختلف الأصعدة.

أجمعت الدراسات على أن الحصويات المعاد تدويرها (**R**ecycled **C**oncrete **A**ggregates **RCA**) هي المواد الناتجة عن هدم الكتل البيتونية المسلحة (بعد نزع حديد التسليح)، وغير المسلحة حيث يتم تكسيرها إلى مقاسات أصغر تحقق متطلبات التدرج المعتمدة في المواصفات القياسية ضمن مجال الاستخدام. يتم استخدام الحصويات المعاد تدويرها RCA ضمن مجالات عديدة منها طبقات التأسيس والخلطات البيتونية والردميات الترابية، إلا أن استخدامها في تصميم المجبول الإسفلتي الساخن HMA مازال محدوداً وذلك بسبب قلة الأبحاث حول تحديد ملاءمتها وإمكانية استخدامها في الخلطات الإسفلتية علماً أن الأبحاث التي أُنجزت في هذا المجال قدمت نتائج مشجعة لاستخدام الحصويات المعاد تدويرها في إنتاج المجبول الإسفلتي الساخن.

في هذه الدراسة نسلط الضوء على إمكانية استخدام الحصويات المعاد تدويرها من مخلفات هدم المباني (المخلفات البيتونية المنشأ) في تصميم الخلطات الإسفلتية الساخنة HMA والخاصة بمتطلبات طبقة التغطية (الاهتراء) الإسفلتية، بعد تعديلها بالحصويات الطبيعية، بهدف إيجاد طريقة فعالة لتقليص الكميات المتزايدة من نفايات الهدم في سورية والحد من الطلب المتزايد على الحصويات الطبيعية.

١-٣- هدف الدراسة:

١. دراسة خواص مواد إعادة التدوير، نواتج نفايات هدم الكتل الإنشائية وتحديد الخواص الهندسية للحصويات المستخلصة من هذه الكتل الإنشائية.
٢. دراسة إمكانية استخدام الحصويات المعاد تدويرها بنسب مختلفة في إنتاج خلطات إسفلتية ساخنة محققة لمتطلبات طبقة اهتراء مجبول إسفلتي.
٣. مقارنة خواص الخلطات الإسفلتية المصنعة من حصويات معاد تدويرها مع المواصفات والشروط العامة للطرق المعمول بها في سورية، وتحديد النسبة المثالية لاستخدام هذا النوع من الحصويات.
٤. للدراسة هدف اقتصادي وبيئي يتجلى بتوفير كميات من الحصويات الطبيعية والحفاظ على البيئة عن طريق تدوير المخلفات الإنشائية في صناعات إنشاء وصيانة الطرق.

١-٤-مجال وتنظيم الدراسة:

يقع هذا البحث في مجال هندسة طبقات الرصف المرن ويختص في مجال دراسة تصميم الخلائط الإسفلتية الساخنة.

سيركز هذا البحث على استثمار مخلفات نواتج الهدم الإنشائية في صناعة الخلطات الإسفلتية من خلال صناعة نوع من الحصويات المعاد تدويرها محققة لمتطلبات الخلائط الإسفلتية.

نظمت الدراسة في ثلاثة فصول:

- **الفصل الأول:** مقدمة توضح إشكالية طرح البحث والهدف منه.
- **الفصل الثاني:** الدراسة النظرية (الخلائط الإسفلتية، نفايات الهدم الإنشائية).
- **الفصل الثالث:** الدراسة العملية وفق المنهجية المتبعة ونتائج الدراسة والتوصيات.

الفصل الثاني

الإطار النظري للدراسة

٢-١- الخلائط الإسفلتية:

الرصف المرن: هو الرصف الذي تتكون طبقته السطحية من البيتون الإسفلتي (البيتوميني)، أما طبقتا الأساس وما تحت الأساس فيمكن أن تكونا من البحص المكسر، أو الخلائط الحصوية الرملية، أو من مواد معالجة بأحد الروابط البيتومينية. ...الخ، ويتميز الرصف المرن بأن مقاومته على الانعطاف ضعيفة جداً، والتشوهات التي قد تحصل في تربة المسار أو أي طبقة أخرى قد تنعكس عبر الطبقات حتى الوصول إلى الطبقة السطحية، ويمكننا عملياً اعتبار الرصف المرن التقليدي مؤلفاً من عدد من الطبقات غير المترابطة أو المترابطة برابط حبيبي والتي يعلوها طبقة تغطية سطحية عادة ما تكون منشأة بوساطة رابط بيتوميني.

تُعرف **الخلطات الإسفلتية** بأنها: مزيج من الحصويات ذات التدرج الحبي المحدد، والإسفلت الصلب ذي الصنف المحدد العادي أو المعدل بأحد الإضافات مع إضافة مواد ناعمة تسمى فلير يتم خلطها بدرجة حرارة محددة وتتخللها فراغات هوائية.

تشكل الحصويات عناصر الهيكل الإنشائي للخلطة أما الإسفلت فيربط العناصر ببعضها وهي مكونات الخلطة الإسفلتية التقليدية.

تُعدُّ الخلطات الإسفلتية المكون الرئيسي لطبقات الرصف في معظم الطرق الحديثة، وبالنظر إلى الوظائف المهمة لهذه الطبقات وخاصة قدرتها على مقاومة الإجهادات المختلفة التي تتعرض لها نتيجة لأحمال المرور والتغيرات الحجمية بسبب اختلافات درجات الحرارة اليومية والموسمية، فإن الخلطات الإسفلتية المطلوبة يجب أن تكون ذات جودة عالية. ويتحقق ذلك بتوفر عدد من الخواص الهندسية والميكانيكية والتي من أهمها الثبات (Stability)، والانسياب (Flow)، وتعمل الخلطات الإسفلتية المستخدمة في مجال الرصف المرن على أساس الخضوع المؤكد

بالانحناء قليلاً تحت كل حمل ثم الرجوع إلى الشكل الأصلي وهو ما يعبر عن خاصية المرونة لهذا النوع من الرصف.

هناك أربع خواص أساسية يجب تحقيقها عند تصميم الخلائط البيتومينية وهي (الثبات، الديمومة، المرونة، مقاومة الانزلاق). عملياً لا يمكن الوصول إلى الحالة المثالية لهذه الخواص الأربعة، ولذلك فإن التصميم الجيد هو التصميم الذي يجمع أكبر نسبة من هذه الخواص.

أظهرت الدراسات الحديثة خصائص أخرى يجب أن تتحقق في الخلائط البيتومينية منها:

– مقاومة الخلائط لظاهرة التعب: التي تنشأ نتيجة الإجهادات الناظمية، والمماسية المتكررة على منشأة الطريق.

– التشققات ومعدل انتشار هذه التشققات تحت تأثير الحرارة المنخفضة.

– قابلية التشغيل أي الحصول على خليط يمكن نقله وفرشه مع المحافظة على مواصفاته.

وفيما يلي نبين المراحل التي يمر بها تصميم الخلطة الإسفلتية:

- اختيار المواد الحصوية.
- اختيار التركيب الحبي.
- تحديد نسب الحصويات.
- تحديد الوزن النوعي للحصويات.
- الوزن النوعي للإسفلت.
- تحضير عينات الاختبار.
- تحديد الكثافة ونسبة الفراغ للعينات.
- تحديد نسبة الإسفلت الأصولية.
- اختبار ثبات وانسياب العينات.

2-2 طرق تصميم الخلائط الإسفلتية:

إن طرق التصميم التي سيتم استعراضها تخص فقط الخلائط الإسفلتية الكثيفة التي يتم مزجها على الحار (Hot mix) كالبيتون الإسفلتي الذي يستعمل في الطبقات السطحية، أو طبقة الأساس في المشاريع ذات الأهمية الكبيرة، أما الخلائط الإسفلتية التي تستعمل في الطرق رخيصة التكاليف كالمعالجة السطحية (Surface Treatments) مثلاً، فلا يمكن تطبيق طرق التصميم هذه عليها.

هناك طرق تصميم كلاسيكية تستعمل على نطاق واسع، وفي مختلف دول العالم حتى هذا اليوم، وهناك طرق تصميم حديثة أصبح بعضها قيد الاستخدام العملي في بعض الأماكن من العالم، وبعضها مازال مقتصراً على الأبحاث العلمية.

إن طرق التصميم بصورة عامة تعتمد على إعطاء توازن بين العناصر البحصية والمواد الإسفلتية بشكل يمكن فيه أن تعطي نتائج مرضية للمتطلبات الأساسية الأربعة بشكل عام، وللثبات والديمومة بشكل خاص.

إن أهم الطرق الكلاسيكية المستخدمة حالياً:

- ❖ طريقة مارشال.
- ❖ طريقة هافيم.
- ❖ طريقة ثلاثي المحاور.

أما أهم الطرق الحديثة:

- ❖ طريقة الرصف الممتاز (Super pave).
- ❖ طريقة السيلان الديناميكية (ESSO).

طريقتا "مارشال" و "هافيم" مبنيتان على التجربة وليس لهما أساس نظري، أما طريقة سوبر بيف فهي طريقة جديدة تخلط بين التجربة والنظرية، تتشابه الطرق باعتمادها على الخواص الحجمية للخلطة ولكنها تختلف بالمنهجية وطرق تحضير العينات ومؤشرات الأداء.

2-2-1 طريقة مارشال Marshall method

إن هذه الطريقة تعتمد على العمل المخبري في تحضير العينات، وقياس الثبات والانسياب يتم بصورة سهلة نسبياً.

قبل البدء بتجربة مارشال يجب تعيين ميزات مختلف العناصر الداخلة في تركيب الخلطة الإسفلتية، فالمواد الحصوية يجب أن تكون جافة، وأن يكون تركيبها الحبي ضمن الحزمة النظامية، كما أن الوزن النوعي الحجمي يجب أن يكون محدداً لكافة العناصر الحصوية بدءاً من العناصر الناعمة وانتهاءً بالعناصر الخشنة، كما أن الوزن النوعي للإسفلت المستعمل يجب أن يكون معروفاً.

يتم تحضير عينات التجريب في قالب اسطواني الشكل قطره (4 inch) وارتفاعه (2.5 inch)، وترص العينات ضمن القالب بسقوط مطرقة وزنها (10 lb) تسقط سقوطاً حراً من ارتفاع (18 inch) حيث يتم رص العينة على الوجهين ويتعلق عدد الطرقات على كل وجه بكثافة المرور على الطريق ونستعمل عادةً:

(٣٥) طرقة للطرق ذات الغزارة القليلة.

(٥٠) طرقة للطرق ذات الغزارة المتوسطة.

(٧٥) طرقة للطرق ذات كثافة المرور العالية.

يتم عادةً تحضير ثلاث عينات لكل نسبة من الإسفلت المستعمل، وعادةً تستعمل خمس نسب من الإسفلت تختلف الواحدة عن الأخرى بنسبة (% 1 – 0.5) .
وفي اليوم التالي لتحضير العينات يتم حساب الكثافات ونسبة الفراغ، وبعد ذلك تغمر العينات في حمام حراري بدرجة حرارة (٦٠ْ) درجة ولمدة (٣٠) دقيقة، ثم تنقل العينات إلى جهاز الثبات لمارشال لقياس ثبات وانسياب العينة.
إن سرعة تحميل العينة تؤثر كثيراً في النتائج وهي محددة في جهاز مارشال بـ (2 in min)، حيث يتم تسجيل أكبر حمولة يتم الوصول إليها خلال التجربة، وهذه تدعى بثبات مارشال (Marshall Stability) للعينة.

الشكل (٢-١) جهاز اختبار مارشال

ويجب ضرب ثبات مارشال للعينة بعامل يسمى عامل التصحيح ويتعلق هذا العامل بحجم العينة وتكون قيمة هذا العامل (١) عندما يكون ارتفاع العينة نظامياً (2.5 inch). في حال نقص ارتفاع العينة عن ذلك فإن عامل التصحيح يزداد عن الواحد، وإذا ازداد ارتفاع العينة عن الارتفاع النظامي فإن عامل التصحيح ينقص عن الواحد.

إن نسبة الإسفلت الأصولية (optimum bitumen content) يمكن تعيينها من تجربة مارشال بأخذ متوسط القيم التالية:

- نسبة الإسفلت التي تعطي قيمة ثبات أعظمية.
- نسبة الإسفلت التي تعطي قيمة الكثافة الجافة الأعظمية.
- نسبة الإسفلت التي تكون عندها نسبة الفراغات الهوائية(4%).

ومن أجل أن يكون تصميم الخلطة الإسفلتية وفق طريقة مارشال مناسباً للأعمال الطرقية فإن دليل الشروط والمواصفات الفنية لأعمال الطرق في سورية يوصي باعتماد القيم الموضحة في الجدول (١-٢).

الجدول(٢-١) مواصفات تصميم H.M.A وفق المواصفات السورية

	طبقة اهتراء			طبقة أساس		
الاختبار	صنف آ	صنف ب	صنف ج	صنف آ	صنف ب	صنف ج
الثبات (kg) كحد أدنى	1100	900	700	1000	800	600
الانسياب (mm)	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4
الفراغات الهوائية %	3-5	4-6	4-6	5-7	5-7	5-7
المادة البيتومينية %	4-6	4-6	4-6	3-6	3-6	3-6

واعتماداً على النتائج المحسوبة والمقاسة يمكن إيجاد:

١. العلاقة بين الكثافة الحجمية ونسبة الإسفلت.

٢. العلاقة بين الثبات ونسبة الإسفلت.

٣. العلاقة بين الانسياب ونسبة الإسفلت.

٤. العلاقة بين نسبة الفراغات المليئة بالإسفلت ونسبة الإسفلت.

٥. العلاقة بين نسبة الفراغات الهوائية ونسبة الإسفلت.

تحديد نسبة الإسفلت الأصولية للخلطة البيتومينية وفق تجربة مارشال بأخذ المتوسط للقيم التالية:

- نسبة الإسفلت التي تعطي قيمة ثبات أعظمية.
- نسبة الإسفلت التي تعطي الكثافة الأعظمية.
- نسبة الإسفلت التي تعطي فراغاتٍ هوائية (٣-٥)%.
- نسبة الإسفلت التي تعطي انسياباً مقداره (٢-٤) mm.
- نسبة الإسفلت التي تعطي فراغات مليئة بالإسفلت (٧٠-٨٠)%.

٢-٣- مواد الهدم وإعادة التدوير:

تزايدت عمليات هدم المباني القديمة والبنى التحتية واستبدالها بمنشآت جديدة، بسبب النمو السكاني المتزايد حول العالم، وترافق هذا النمو العمراني مع تولد كميات متزايدة من نفايات الهدم، مثلاً يتولد عن الاتحاد الاوروبي حسب التقديرات سنوياً حوالي /٨٥٠/ مليون طن من نفايات الهدم والبناء، وفي نيوزيلاندا ينتج سنوياً حوالي /١٤/ مليون طن من نفايات الهدم يتم تدوير /٨/ مليون طن منه في أعمال الطرق، أما ألمانيا فتنتج سنوياً حوالي /٢٨٥/ مليون طن من نفايات البناء، وتقدر كميه نفايات الهدم بـ /٧٧/ مليون طن يعاد استخدام /٧٠%/ منها كحصويات معاد تدويرها في طبقات الطرق، وتنتج فرنسا سنوياً حوالي /١٣/ مليون طن من نفايات البيتون، وفي اليابان يتولد سنوياً حوالي /١٠- ١٥/ مليون طن ترتفع هذه القيمة إلى /٢٠/ مليون طن سنوياً في هونغ كونغ، وتواجه صعوبات جدية للتخلص منها، أما الولايات المتحدة الأمريكية فتنتج سنوياً حوالي /١٢٣/ مليون طن من نفايات الهدم ناتجة عن أعمال تجديد البنى التحتية علماً أنها تستهلك سنوياً /٢،٧/ بليون طن من الحصويات حوالي 40 -30 % منها في قطاع النقل.

تعدُّ عملية إعادة تدوير نفايات هدم المباني ذات ميزات اقتصادية وبيئية مع تزايد كميات الهدم يومياً وارتفاع تكاليف الموارد الطبيعية بالإضافة لاختناق المساحات المخصصة كمطامر بالكميات الهائلة منها، وبدأ استخدام الحصويات المعاد تدويرها في أعمال البناء منذ نهاية الحرب العالمية الثانية حيث يتم طحن نفايات البيتون المهدمة بحجوم محددة وفق المواصفات واستخدامها كحصويات معاد تدويرها RCA في تثبيت الطبقات الحصوية للطرق وأعمال التصريف ولاحقاً في إنتاج خلطات بيتونية وإسفلتية مما وفر طرق آمنة وفعالة للتخلص من نفايات الهدم وإدارة كمياتها عبر إعادة استخدامها كحصويات في أعمال مدنية أخرى.

يمكن تلخيص فوائد عمليات إعادة التدوير فيما يأتي:

- ✓ الحفاظ على البيئة عبر التقليل من كميات الهدم المرمية بشكل عشوائي.
- ✓ التقليل من مساحة المطامر الموجودة للتخلص من تلك النفايات.
- ✓ فسح المجال أمام استخدام الأراضي في منشآت مدنية أخرى.
- ✓ التقليل من استنزاف المصادر الطبيعية والحفاظ عليها.
- ✓ التقليل من كلفة الإنشاء.
- ✓ التقليل من استهلاك الطاقة.
- ✓ فتح سوق عمل جديد في مجال البناء.

أما بالنسبة للأسباب التي تعوق إعادة تدوير النفايات الإنشائية فتشمل:

- ☒ عدم وجود التكنولوجيا اللازمة ومرافق إعادة التدوير والتي تتناسب مع كميات الهدم المتولدة (تجهيزات ثابتة أو متنقلة) للتقليل من تكاليف النقل بالإضافة لعدم وجود معايير ومواصفات ناظمة لاستخدامها.
- ☒ قلة الوعي العام حول القدرة على استخدام الحصويات المعاد تدويرها في مشاريع البناء.
- ☒ قلة الوعي بالمشاكل والأخطار الناجمة عن التراكم المتزايد للنفايات الإنشائية.
- ☒ عدم توفر رأس المال لمشاريع إعادة التدوير.
- ☒ المواد المعاد تدويرها لا تتوفر بنفس الخصائص (القوة والمتانة) بكميات مناسبة مقارنة مع الحصويات الطبيعية.

٢-٣-١- مراحل إعادة التدوير:

تمر عملية إعادة التدوير بعدة مراحل من تجميع مواد الهدم وفرزها، التكسير وفق الحجوم المطلوبة، التخزين المؤقت للحصويات المعاد تدويرها.

أولاً: تحضير وتجميع نفايات الهدم:

أحد العوامل المهمة للحصول على حصويات معاد تدويرها جيدة هي معرفة وتحديد خصائص مواد الهدم الأصلية (نوع الاسمنت، مقاومة البيتون الأصلي، نوع الحصويات الأصلية، ومحتوى الفراغات)، ويمكن أن تؤمن هذه المواصفات مؤشرات جيدة لبيان مدى جودة الحصويات المعاد تدويرها وملاءمتها للاستخدام في الأعمال المدنية حيث يتم في هذه المرحلة فصل نفايات الهدم كل حسب نوعه (نفايات بيتون، نفايات خفان، نفايات قرميد...).

ثانياً: تكسير الكتل البيتونية:

هناك عدة طرق لتكسير الكتل البيتونية وتقليل حجمها وبشكل عام تصنف معدات الكسر في شكلين:

- ❖ كسارات بالصدم وتعمل على مبدأ تطبيق قوة كسر وحيدة لتحطيم الكتل البيتونية الكبيرة.
- ❖ كسارات نبضية وتعتمد على تطبيق قوى كسر بشكل جيبي متناوب بتواتر عالي لتكسير الكتل البيتونية.

بعد أن يتم تكسير الكتل البيتونية وتقليل حجمها يتم تجميعها في مكان محدد خارج أو ضمن المشروع حسب طبيعته ويتم في هذه المرحلة إزالة حديد التسليح إما بشكل يدوي أو باستخدام آلات فصل الكترومغناطيسية في المشاريع الكبيرة، ويمكن أن تتم عمليات غربلة للحصويات المعاد تدويرها للتأكد من خلوها من أي شوائب قد تنشأ من عمليات الهدم ولكن هذه العملية بالإضافة لعملية النقل قد تضيف كلف إضافية على عمليات إنتاج الحصويات المعاد تدويرها RCA يجب أخذها بعين الاعتبار.

يمكن تحديد القطر الأعظمي المطلوب في أثناء عمليات الكسر عبر توجيه فتحة الكسارة ولكن في هذه الحالة يتم الحصول على كميات كبيرة من القطر الأعظمي والمواد الناعمة وكميات أقل

من الأقطار ذات الحجم المتوسط وهذا النقص سوف يتطلب عمليات تكسير أخرى لتعويضه. وتتعلق إنتاجية الكسارات للحصويات المعاد تدويرها RCA بالقطر الأعظمي المطلوب حيث تؤمن الأقطار الأكبر من 1.5 in إنتاجية تصل لـ /80%/، أما الأقطار الأقل من 19 mm فقد تصل إنتاجيه الكسارة /60%-55/ بسبب زيادة النواعم خلال عمليه التكسير لزيادة الزمن اللازم للتكسير.

ثالثاً: التخزين المؤقت للحصويات

يمكن تخزين الحصويات المعاد تدويرها، كما يتم تخزين الحصويات الطبيعية مع ملاحظة حمايتها من كافة أشكال الرطوبة قدر الإمكان لأن الحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA قد تحتوي على نسبة من الاسمنت غير المتميه والتي يمكن أن تتأثر بالرطوبة

٢-٣-٢- العوامل المؤثرة على إعادة التدوير:

٢-٣-٢-١- العوامل الفنية:

استناداً إلى البيانات التي تم جمعها من الوثائق والتجارب الشخصية وزيارات المواقع التي قام بها الباحثون في مجالات مواد البناء والبيئة تم تحديد عدد من العوامل الفنية التي يمكن أن تؤثر على إنتاجية الحصويات المعاد تدويرها ومن هذه العوامل: مواصفات المواد المراد إنتاجها، حيث يلعب توزع المقاسات دوراً في التأثير على كمية الحصويات المراد إنتاجها، وعلى الطلب المحلي للحصويات، وسعر المنتج في السوق ويتغير الطلب على المقاسات المختلفة تبعاً لتغير ظروف السوق، وحسب خبرة المشغلين للاستجابة للتغيرات في متطلبات الإنتاج، كما يؤثر تكوين المعدات في المحطة على نوعية المنتج وكفاءة العمل (محطات ثابته أو متنقلة)، ويجب أن يتم اختيار المعدات المتنقلة بما يتلاءم مع ظروف شبكة الطرق المتاحة، في حين أن المحطات الثابتة تكون أكبر حجماً، وأكثر عملاً فتكون كلفة الإنتاج والنقل أقل مقارنة من المحطات المتحركة.

تنخفض متطلبات اليد العاملة في محطات إعادة التدوير وتتطلب العملية المثالية وفقاً لبعض الدراسات حوالي /١٠/ أفراد، وتشكل تكاليف اليد العاملة في محطة التدوير حوالي /30-20%/

من كلفة التشغيل الإجمالية، وترتفع تكاليف اليد العاملة في المحطات المتنقلة بسبب زيادة عدد العمال المطلوب في أثناء عمليات الفك والتركيب بعد كل عملية.

أيضاً تؤثر خصائص مصدر المادة على فعالية وجودة المنتج وكذلك على معدات العمل اللازمة، حيث تتنوع مصادر المواد وخصائصها، بالتالي سوف تتفاوت نوعية المواد الناتجة ودرجة نظافتها.

العمر المفيد للطبقة التي سوف تستخدم فيها الحصويات يؤثر على مقدار الطلب على الحصويات، وكميتها، والمبلغ الذي يجب رصده لعمليات الصيانة، وخصائص الحصويات المطلوبة، والخيارات الاقتصادية المتاحة، وظروف الطقس.

٢-٣-٢-٢- الدعم الحكومي للمواد المعاد تدويرها:

يتمثل الدعم الحكومي للمواد المعاد تدويرها بالترويج لها وتوسيع مجالات استخدامها ووضع المواصفات للتشجيع لاستخدامها، هذا ووضعت العديد من دول العالم مواصفات لاختيار المواد المعاد تدويرها في التطبيقات الهندسية تعرف هذه المواصفات خصائص المنتج تبعاً لمجال الاستخدام ويعمل بهذه المواصفات على كامل البلاد.

نبين في المثال الآتي قائمة بمواصفات الحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون لاستخدامها كحصويات في طبقة الأساس للطرق ومن هذه المواصفات:

- RCA غير مكلفة ولا تتأثر بالرطوبة بشكل كبير.
- RCA تمتلك محتوى رطوبة مثالي حوالي /10%/ ويعزا ارتفاع الرطوبة مقارنة مع الحصويات الطبيعية بسبب زيادة امتصاصيتها.
- RCA أخف وزنا من الحصويات الطبيعية بمقدار /15-10%/
- يمكن رصها بسرعة أكبر من الحصويات الطبيعية بحوالي ٢-٣ مرات.

أمَّا السلبيات فهي انخفاض المقاومة على الضغط مقارنة مع الطبيعية.

٢-٣-٢-٣ عوامل النقل:

تعدُّ مسافة النقل وتكاليف النقل عنصراً أساسياً في العملية التي تحدد فعالية استخدام الحصويات المعاد تدويرها في المنطقة ولكنها عادة لا تؤثر على الربحية التشغيلية لعملية إعادة التدوير لأن تكاليف النقل عادة لا تتحملها محطات إعادة التدوير.

تحدد كمية المواد الداخلة إلى المحطة فرق التكاليف بين حالة تدوير المواد أو إرسالها للمطامر كما تتغير مسافة النقل وفق تغير شروط الموقع لمصدر المواد وتغيرات السوق.

٢-٣-٢-٤ عوامل الموقع (موقع منشآت التدوير):

يعدُّ تحقيق حد أدنى للمسافة بين موقع محطات التدوير، والأسواق هو أحد المعايير المهمة لنجاح عملية التدوير، وبما أن المصدر الأساسي للمواد المعاد تدويرها هو البنى التحتية في المدن والأبنية السكنية فإن الموقع الأفضل لمحطات إعادة التدوير هو على أطراف المدن.

هناك كثير من العوامل التي تؤثر في اختيار موقع محطات إعادة التدوير، ويمكن القول بأن صاحب المحطة البعيدة سوف يعمل على تقديم بعض التسهيلات بهدف تشجيع المقاولين لجذب أكبر كمية للمواد المعاد تدويرها بما ينسجم مع متطلبات السوق المحلية وتغطية نفقات التشغيل في حين أن المحطات القريبة من أماكن التغذية ستكون أعلى أجراً.

أمَّا في حال تساوي المسافة بين أماكن التغذية ومحطات التدوير من جهة والمطامر من جهة أخرى فإن أغلب المقاولين سوف يميلون للتخلص من النفاية في المطامر على إرسالها لمحطات التدوير.

٢-٣-٣- الحصويات المعاد تدويرها RCA:

يمكن تعريف الحصويات المعاد تدويرها بأنها: «كل ما ينتج عن هدم الكتل البيتونية المسلحة (بعد نزع حديد التسليح)، وغير المسلحة حيث يتم تكسيرها إلى حجوم أصغر بما يتوافق مع متطلبات المواصفات المعتمدة حسب مجال الاستخدام».

يمكن استخدام الحصويات المعاد تدويرها RCA بدون معالجة في رصف المواقف وطبقات الطرق وحواجز امتصاص الصوت والأجسام الترابية وفي تصميم خلطات بيتونية على ألا يتجاوز نسبة شوائب الخشب عن /10%/ من الحجم الكلي وفي الخلطات الإسفلتية على ألا تتجاوز نسبة شوائب الكلس عن 1.5%.

تحقق الحصويات المعاد تدويرها RCA حوالي /100%-80/ من مقاومة الحصويات الطبيعية وذلك تبعاً لمقاومة البيتون الأصلي المصنعة منه إلا أن هذه الحصويات ذات كثافة أقل مقارنة مع الحصويات الطبيعية وهذا يعني مسامية أعلى وزيادة الامتصاصية.

تختلف الحصويات المعاد تدويرها من نواتج هدم البيتون RCA بخواصها عن خواص الحصويات الطبيعية، ويرجع هذا الاختلاف إلى وجود طبقة المونة الإسمنتية المتبقية على سطح الحبيبات بسبب عملية التكسير، تؤثر هذه الطبقة على خواص المسامية والامتصاصية للحصويات، كما تتعلق خواص الحصويات المعاد تدويرها بخواص المواد الأصلية المصنع منها البيتون الفيزيائية والكيميائية وبنسبة الملوثات في خليط الحصويات (جبس، خشب، كبريتات...)، إلا أن معظم الباحثين وجدوا أنه يمكن استخدامها كبديل عن الحصويات الطبيعية.

أولاً: محتوى المونة الإسمنتية:

سجلت دراسة كندية أجريت على الحصويات المعاد تدويرها بأن محتوى المونة الإسمنتية يمكن أن يرتفع إلى /41%/ من الحجم الكلي حسب مصدر الكتل البيتونية وتركيبها وطريقة التكسير كما يعتمد على نوع الحصويات الطبيعية المستخدمة في البيتون الأصلي (شكلها، مساميتها...) كما يتعلق الأداء الميكانيكي للحصويات المعاد تدويرها RCA سواء استخدمت في طبقات التأسيس أو الخلطات الإسفلتية أو البيتونية أو في طبقات التصريف بمحتوى المونة الإسمنتية الذي يعتبر الاختلاف الأساسي بين الحصويات الطبيعية والحصويات المعاد تدويرها.

ثانياً: الوزن النوعي

يعبر الوزن النوعي عن نسبة كثافة الحصويات إلى كثافة الماء ويمكن أن تعطي قيمة الوزن النوعي صورة عن كمية الإسفلت اللازمة عند تصميم الخلطات. يعتمد قيمة الوزن النوعي بشكل

كبير على محتوى المونة الإسمنتية حيث يقل الوزن النوعي للحصويات كلما زاد محتوى المونة الإسمنتية فيها، كما تتأثر قيمة الوزن النوعي للحصويات بحجم الحبة وامتصاصيتها.

ثالثاً: الامتصاصية

ترتفع خواص الامتصاصية للحصويات المعاد تدويرها مقارنة مع الحصويات الطبيعية وذلك يعود أيضاً لوجود طبقة المونة الإسمنتية. ويمكن أن تتراوح هذه القيمة بين /% 10 – 2/ معتمدةً على خواص الامتصاصية للحصويات في البيتون القديم وطريقة التكسير.

رابعاً: شكل الحبة وملمس السطح

يعبر ملمس السطح عن نمط الخشونة أو النعومة النسبية لسطح الحبات، ويلعب هذا العامل دوراً في تحديد درجة الترابط بين الحصويات والرابط، حيث تزداد قوة الترابط وجودة استناد الحبات على بعضها تحت تأثير الأحمال كلما زاد السطح الخشن للحبات.

تلعب خشونة السطح دوراً فعالاً في التأثير على قابلية التشغيل للمجبول الإسفلتي وعلى نسبة الماء التي تحتاجها الخلطة البيتونية، وتعتبر أفضل الحبات الصالحة للاستخدام في الأعمال المدنية هي الحبات المكسرة التي تمتلك شكلاً غير منتظم، وزاوية الشكل التي تميل للتشابك فيما بينها عند تعرضها لأحمال ضاغطة. تمتلك الحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA سواءً أكانت خشنة أو ناعمة سطحاً خشناً مع حواف زاوية غير مستديرة بسبب عمليات التكسير.

خامساً: مقاومة الصقيع

تتنوع مقاومة الصقيع للحصويات المعاد تدويرها بشكل كبير وتعتمد على امتصاصية الحصويات في البيتون القديم والنظام المسامي المتروك للتخفيف من أي إجهادات داخلية يمكن أن تنشأ في الطبقة مسببة تكسرها.

٢-٣-٤- استخدام الحصويات المعاد تدويرها في طبقات الرصف الطرقي:

أجريت العديد من الدراسات والأبحاث المخبرية بهدف دراسة إمكانية استخدام الحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA في طبقات الرصف الطريق (ما تحت الأساس والأساس الحصوي وطبقة المجبول الإسفلتي أو البيتوني)، ودراسة تأثير النسب المختلفة للحصويات المعاد تدويرها على مواصفات والخواص الهندسية للطبقة. أظهرت نتائج الأبحاث إمكانية استخدام هذه المواد بشكل مباشر أو بعد معالجتها في مجال الرصف الطرقي بنجاح حيث حققت الحدود المطلوبة في المواصفات، ونستعرض فيما يأتي جانياً من الأبحاث والدراسات التي استخدمت الحصويات المعاد تدويرها في مجال الرصف الطرقي.

قام Mostafa عام ٢٠١٥ بإجراء دراسة [٥] بعنوان **(تطوير مجبول إسفلتي حار ملائم بيئياً باستخدام الحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA)**

كان الهدف منها تقييم ودراسة تأثير النسب المختلفة للحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA كبديل عن الحصويات الطبيعية NA في تصميم الخلائط الإسفلتية الحارة HMA عبر تصميم خلائط إسفلتية بنسبة من الحصويات معاد تدويرها RCA وهذه النسب على الشكل التالي (% 100 -60 – 45 – 30 – 15 – 0) باستخدام إسفلت /70-60/. تم الحصول على عينات نواتج هدم البيتون من بلاطة بناء قديم حيث تم إزالة حديد التسليح وتكسيرها وفق الحجوم المحققة للتدرجات النظامية باستخدام الكسارات.

بينت الدراسة انخفاض قيم الوزن النوعي، وارتفاع اهتراء وامتصاصية الحصويات المعاد تدويرها مقارنة مع الحصويات الطبيعية. وكانت القيم التي وفقاً للدراسة موضحة في الجدول رقم (٢ - ٢).

جدول (٢-٢) نتائج الخواص الفيزيائية للحصويات الخاصة بالدراسة [٥]

	حصويات معاد تدويرها RCA	**حصويات طبيعية NA**
الوزن الحجمي gr/cm^3	٢،٣٣٧	٢،٤٤٨
الفاقد بالاهتراء %	٤٣،٦	٢٤،٦٨
الامتصاصية %	٥،٧	٢،٥

أما نتائج الثبات والانسياب والكثافة ومحتوى البيتومين الأمثل لعينات الخلائط الإسفلتية في الدراسة عند كل نسبة حصويات معاد تدويرها RCA فقد كانت كما هي موضحة في الجدول رقم (٢-٣).

جدول (٢-٣) نتائج تصميم الخلائط الإسفلتية الخاصة بالدراسة [٥]

نسبة % RCA	٠	١٥	٣٠	٤٥	٦٠	١٠٠
OAC %	٥،٥	٥،٨	٦،١	٦،٤	٦،٦	٧
الثبات kg	٩٤٨	٨٨١	٨٥٤	٨٤٦،٤	٧٦٤	٦٨١،٥
الانسياب mm	٢،٨٨	٢،٩	٣،٣	٣،٥	٣،٦	٣،٥
كثافة مارشال gr/cm^3	٢،٣١٣	٢،٢٨١	٢،٢٦٩	٢،٢١٧	٢،٢٢٤	٢،١٧

يلاحظ تزايد الانسياب ومحتوى الإسفلت الأمثل OAC وتناقص الكثافة مع تزايد نسبة الحصويات المعاد تدويرها RCA، كما يلاحظ انخفاض قيمة الثبات مع تزايد نسبة الحصويات المعاد تدويرها إلا أنها كانت ضمن المواصفات المحددة في المواصفة.

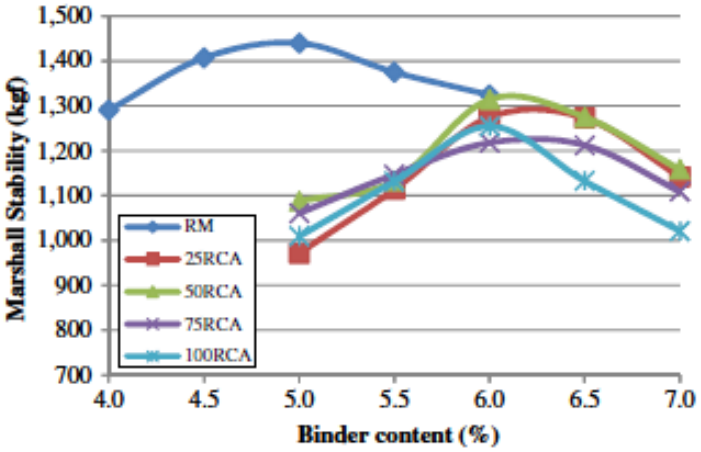
قام Motter في العام ٢٠١٥ بدراسة أداء المجبول الإسفلتي الحار المصنع باستخدام حصويات معاد تدويرها من ناتج هدم البيتون. هدفت الدراسة إلى تقييم استخدام الحصويات المعاد تدويرها من ناتج عدم البيتون RCA كحصويات خشنة في تصميم الخلطات الإسفلتية الساخنة كبديل عن الحصويات الطبيعية NA، ودراسة تأثير النسب المختلفة من الحصويات المعاد تدويرها على الخصائص الحجمية للمجبول عبر تصميم خلائط من المجبول الإسفلتي الساخن بطريقة مارشال (حالة طرق خفيفة المرور) باستخدام نسب من الحصويات المعاد هي (0 – 25 50– 75 – 100 %) وباستخدام إسفلت /٥٠-٧٠/.

أظهرت نتائج الدراسة بأن الحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA ذات امتصاصية عالية، ووزن نوعي منخفض مقارنة مع الحصويات الطبيعية NA كما هو مبين في الجدول رقم (٢-٤).

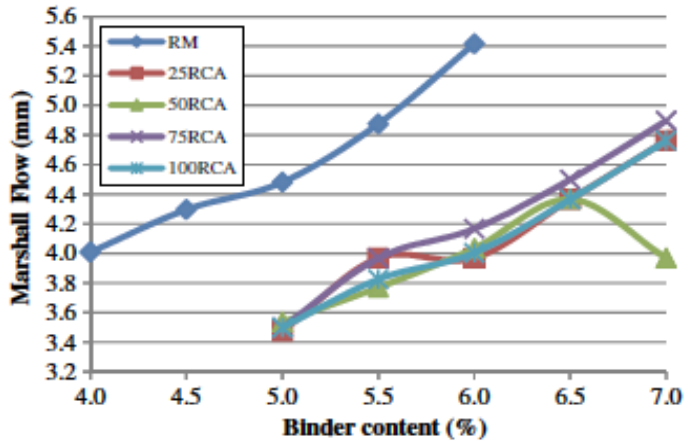
جدول (٢-٤) الخواص الفيزيائية للحصويات المعاد تدويرها والطبيعية المستخدمة في الدراسة [٣]

	الامتصاصية %	الوزن النوعي الظاهري gr/cm^3	الوزن الحجمي gr/cm^3	الفاقد بالاهتراء %
خشنة NA	٠،٥-٠،٨	٢،٦٨٤-٢،٧٥٦	٢،٦٢٩-٢،٧	١٦
خشنة RCA	٤،٣-٩،١	٢،٦٥٣	٢،١١٩-٢،٤١٩	٢٧
ناعمة NA	١،١	٢،٦٣٥	٢،٥٦	-

أظهرت نتائج الدراسة تناقص ثبات الخلطات الإسفلتية وازدياد الانسياب مع تزايد نسبة الحصويات المعاد تدويرها RCA بالمقارنة مع الخلطة التقليدية إلا أنها كانت ضمن المواصفات المطلوبة كما هو مبين في الشكل (٢-٢).

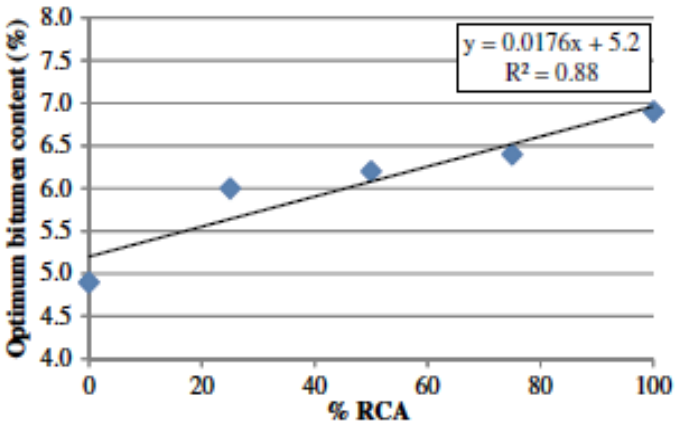


الشكل (٢-٢) نتائج الانسياب بحسب نسبة الإسفلت للخلائط المصممة



الشكل (٢-٣) نتائج الانسياب بحسب نسبة الإسفلت للخلائط المصممة

كما بينت الدراسة بأن تزايد نسبة الحصويات المعاد تدويرها RCA في الخلطة الإسفلتية يؤدي لتزايد محتوى الإسفلت المثالي OAC، ويبين الشكل العلاقة بين نسبة الإسفلت المثالية ونسبة الحصويات المعاد تدويرها المستخدمة في كل خلطة.



الشكل (٢-٤) العلاقة بين نسبة الإسفلت المثالية ومحتوى الحصويات المعاد تدويرها RCA

قام **Sarrag** وآخرون في عام ٢٠١٤ باستخدام مخلفات البناء الإنشائية كحصويات خشنة في المجبول الإسفلتي الساخن.

أجريت الدراسة كتقييم أولي لإعادة استخدام مخلفات المباني البيتونية C&D كحصويات خشنة في الخلطات الإسفلتية، حيث تم الحصول على الحصويات المعاد تدويرها RCA من ناتج هدم بناء سكني قديم عمره /٢٠/ سنة، حيث تم تكسير البيتون ونخله وفق التدرج الحبي المطلوب لإنتاج خلطة إسفلتية حسب المواصفة العامة للطرق والجسور المعدلة عام ٢٠٠٣ في العراق.

أما نسب الحصويات المدورة RCA في الخلطة فكانت (100% – 75 – 50 – 25 – 0) من وزن الحصويات الكلي في الخلطة على ألا يتجاوز قطر الحبة 12.5 mm. يبين الجدول (٢-٥) نتائج تصميم الخلطات الإسفلتية وفق مارشال عند كل نسبة من نسب استخدام الحصويات المعاد تدويرها.

الجدول (٢-٥) نتائج تصميم الخلطات الإسفلتية وفق مارشال [٦]

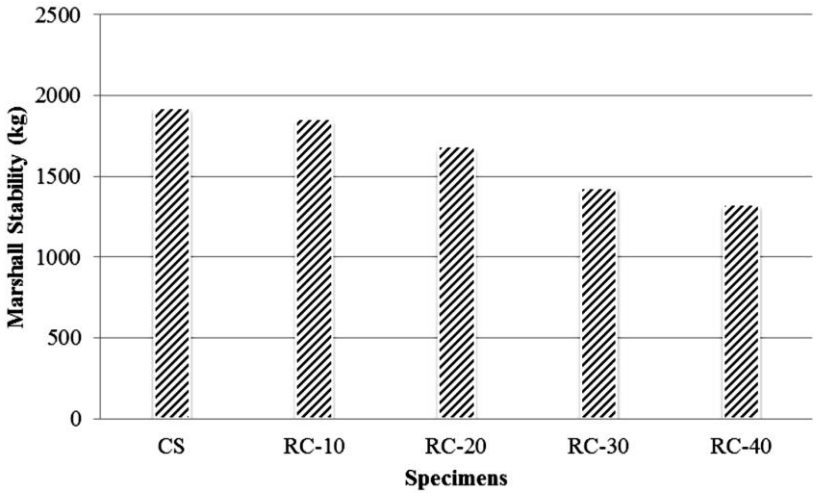
RCA100%	RCA–75%	RCA-50%	RCA 25%	RCA- 0%	
خارج المواصفات	5.5	5.42	5.34	5.26	**محتوى البيتومين الأمثل %**
2.178	2.216	2.280	2.289	2.223	**كثافة حجمية gr/cm^3**
10.8	11.62	12.6	11.33	10.7	**الثبات KN**
3.9	3.6	3.4	3.8	3.7	**الانسياب mm**
2.77	3.23	3.71	2.98	2.89	**الصلابة KN/mm**

كما أجري اختبار الشد غير المباشر على عينات الخلائط الإسفلتية وبينت النتائج تزايد مقاومة الشد غير المباشر لعينات المجبول الإسفلتي مع تزايد نسبة الحصويات المعاد تدويرها RCA حتى نسبة /٥٠%/ تبدأ بعدها المقاومة بالتناقص مع تزايد نسبة الحصويات المعاد تدويرها.

قدم **EKTAS** في عام ٢٠١٢، دراسة استخدام نفايات البيتون في إنتاج المجبول الإسفلتي الحار، [٧] بهدف معرفة تأثير نسبة الحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA على خواص المجبول الإسفلتي الحار HMA حيث تمت إضافة الحصويات المدورة لعينات خلائط إسفلتية مصنعة مخبرياً وفق طريقة مارشال بنسب مختلفة % 40 – 30 – 20 – 10/ – 0/ من وزن الحصويات الخشنة. أما عينات الحصويات المعاد تدويرها والتي استخدمت في هذه الدراسة فقد كانت من ناتج تكسير مكعبات بيتونية بأبعاد 15*15*15 cm

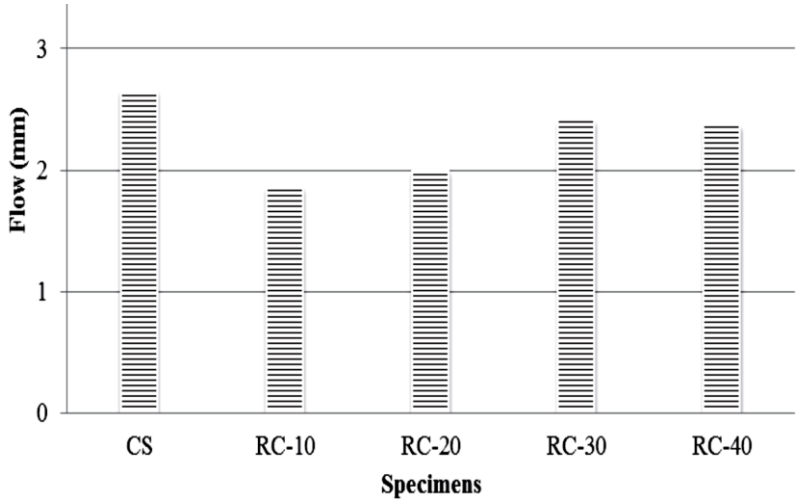
بينت النتائج أن نسبة الإسفلت المثالية OAC تزداد مع زيادة نسبة الحصويات المعاد تدويرها RCA مقارنة مع الخلطات التقليدية وهذا بسبب زيادة امتصاص الإسفلت مما يقلل من الإسفلت المتوفر لتغليف الحبات الحصوية، تزداد الفراغات الهوائيةVT، والفراغات بين الحصويات VMA مع تزايد نسبة الحصويات المعاد تدويرها RCA، بسبب المسامية العالية للحصويات المدورة مقارنة مع الحصويات الطبيعية.

إن ثبات الخلطات الإسفلتية التي تحتوي على الحصويات المعاد تدويرها كان أقل مقارنة مع العينات التقليدية ولكنها كانت محققة للحد الأدنى المطلوب في المواصفات. والشكل (٢-٥) يبين نتائج ثبات مارشال للعينات المختبرة.



الشكل (٢-٥) نتائج ثبات الخلائط الإسفلتية التصميمية [٧]

يتناقص الانسياب مع تزايد نسبة الحصويات المدورة RCA لأن سماكة طبقة الإسفلت التي تغلف حبة الحصويات المدورة أقل من سماكة الطبقة التي تغلف حبة الحصويات الطبيعية وهذا يقلل من الانسياب، والشكل (٢-٦) يظهر قيم الانسياب للعينات المختبرة في الدراسة.



الشكل (٢-٦) نتائج انسياب الخلائط الإسفلتية التصميمية [٧]

قدم **Alfaqawi** في عام ٢٠١٢ دراسة استخدام الحصويات المعاد تدويرها في إنتاج المجبول الإسفلتي الحار في قطاع غزة [٨]، من خلال تحديد الخواص الأساسية للحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA وتقييم تأثيرها على خواص الخلطات الإسفلتية الحارة HMA باستخدام نسب متغيرة RCA (0-30-60%) وفق منهجية عمل مخبري لتصميم خلائط إسفلتية وفق طريقة مارشال.

بينت النتائج أن استخدام الحصويات المعاد تدويرها بنسبة /30 %/ أظهر تحسناً ملحوظاً في أداء الخلطات مقارنة مع الحصويات الطبيعية حيث زاد معامل الصلابة/25%/ هذا يؤدي لإنقاص سماكة طبقة الإسفلت وزادت مقاومة التعب بمقدار /100%/، وبالمقابل زادت نسبة الإسفلت المثالية / 0.35%/ بالمقارنة مع الخلطات التقليدية. كما تتناقص الكثافة الأعظمية مع تزايد نسبة الحصويات المدورة ومع تزايد محتوى الإسفلت الأمثل.

درس ميا في عام ٢٠١٣ إمكانية تدوير نواتج هدم الأبنية لاستخدامها في إنشاء الطرق المحلية في مدينة اللاذقية، حيث هدف الباحث لمعرفة مدى إمكانية تدوير وإعادة استخدام الدبش الناتج عن تكسير نفايات (أنقاض الهدم والإنشاءات C&D، وخاصة مادتي البيتون والبلوك الإسمنتي

الناتجتين عن هدم الأبنية في مدينة اللاذقية)، وإمكانية تصنيعها محلياً بالشروط والمواصفات الفنية المناسبة لأعمال إنشاء الطرق وصولاً لإنتاج حصويات تستخدم في إنشاء طبقات رصف الطرق المحلية في مدينة اللاذقية، من خلال توصيف مواد الهدم الإنشائية من ثلاثة مواقع ومقارنة مواصفاتها مع مواصفات طبقتي الأساس وما تحت الأساس الحصوي.

تضمنت الاختبارات التي قام بها الباحث (التحليل الحبي، حدود أتربرغ، الكثافة، المكافئ الرملي، بروكتور، CBR، الضغط البسيط)، وبينت النتائج أن نواتج تكسير البيتون تصلح كحد أدنى لأعمال إنشاء طبقة ما تحت الأساس في الرصف الطرقي حيث بلغت قيم التحمل النسبي CBR مقدار 80%، كما أن نواتج الهدم من الخفان أعطت قيماً جيدة للتحمل النسبي CBR، حيث بلغت قيمتها ٦٢%، لكن لا يمكن استخدامها في أعمال الرصف الطرقي كون اهتراءها يزيد عن ٥٠%. بينما صلابة الحصويات الناتجة عن هدم البيتون وتدويره جيدة وبالتالي يمكن استخدامها في الرصف الطرقي حيث كان الفاقد بالاهتراء أقل من /45%/.

إن التراكيب الحبية الناتجة عن هدم الأبنية يمكن أن تكون مطابقة للمواصفات الفنية من خلال تعديلها بحصويات طبيعية أو اتخاذ اجراءات لضبط عملية تكسير وتدوير نواتج الهدم.

يمكن استخدام الحصويات المعاد تدويرها في أعمال الأرصفة الطرقية وأعمال البيتون المغسول كأحد أنواع الأرصفة الجمالية، والبيتون المزخرف يمكن رصفه في أرضية الحدائق والأرصفة وممرات المشاة والطرقات وجوانب المنازل وبالإضافة إلى ذلك يمكننا استخدامه في الطرق ذات الكثافة المرورية المنخفضة بعد إضافة ألياف مقوية.

قدم أصلان عام ٢٠١٦ دراسة حول ملاءمة استخدام أنقاض الهدم المحلية المدورة في صناعة بعض مواد البناء ومنها بلاط الأرصفة العادي والمتداخل (الانترلوك)، بينت النتائج ملاءمة الحصويات المعاد تدويرها بشكل جيد لصناعة بلاط الأرصفة الإسمنتي، وأن هناك هامش أمان كاف يتيح استخدام هذه المواد المعاد تدويرها بشكل كبير في خلطات البلاط الإسمنتي ولنسب استبدال يمكن أن تصل إلى /١٠٠%/، ويعود ذلك للمحتوى الجيد للحصويات المعاد تدويرها من المواد الناعمة وهو ما ينعكس إيجاباً على اكتناز خلطة البلاط الإسمنتي وامتصاص الماء والمقاومة على الشد بالانعطاف.

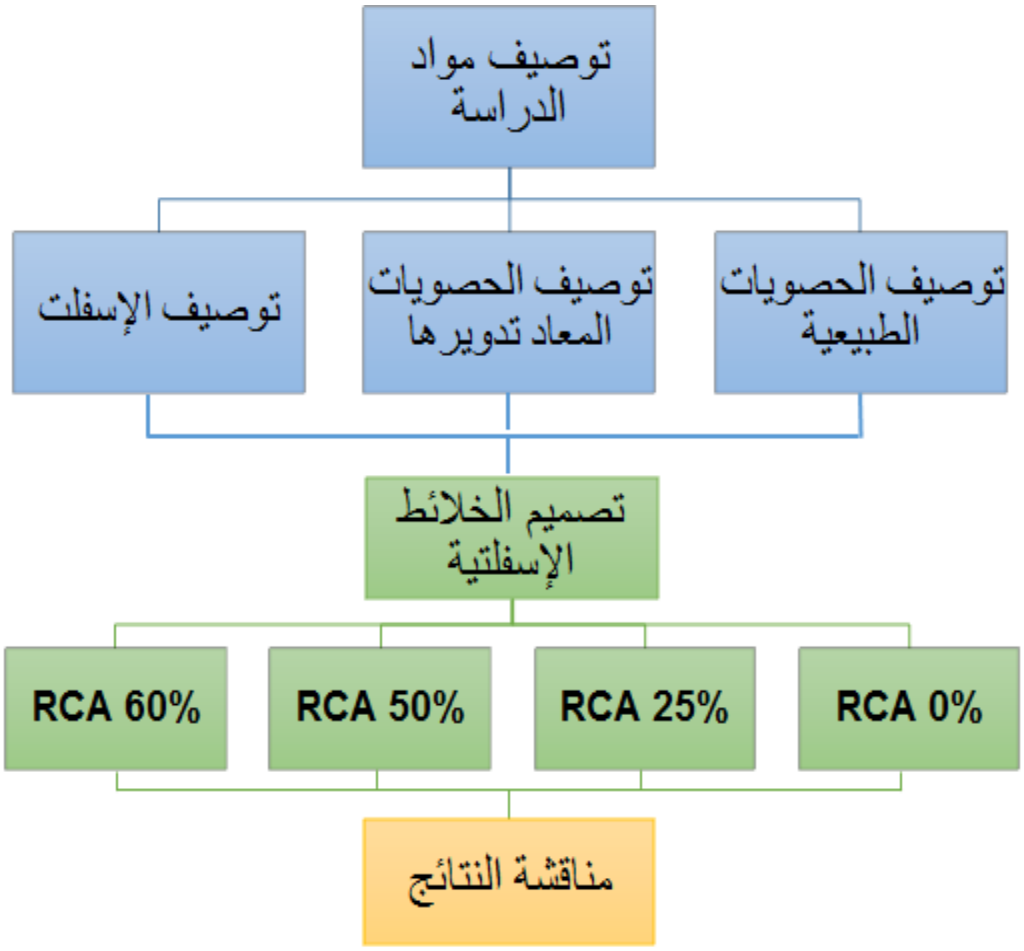
بينت نتائج دراسة استخدام الحصويات المعاد تدويرها في تصنيع بلاط الأرصفة المتداخل (الأنترولوك) أن المقاومة على الضغط البسيط تزداد بشكل ملحوظ مع ازدياد نسب الاستبدال وذلك حتى النسبة /٦٠ %/، ويعود ذلك للتأثير الإيجابي للحصويات المعاد تدويرها على الاكتناز والمقاومة.

كما درست أبحاث عديدة إمكانية استثمار الحصويات المعاد تدويرها في إنتاج البيتون البورتلاندي بأنواعه ومنها استخدام الحصويات المعاد تدويرها في إنتاج بيتون مرصوص، واستخدام هذا النوع من الحصويات في إنتاج بيتون إسمنتي لمناطق خاصة مثل ساحات وقوف أو رصف لحركة مرور خفيفة.

الفصل الثالث

النتائج المخبرية

٣-١- منهجية العمل المخبري:



الشكل (٣-١) منهجية العمل المخبري

٣-٢- نتائج اختبارات توصيف الحصويات الطبيعية:

الحصويات الطبيعية المستخدمة في تصميم الخلطة الإسفلتية هي حصويات كلسية قاسية مكسرة والتي لا يزيد قطر الحبة عن 19 mm، لتصنيع عينات خلائط إسفلتية من أجل عملية الدراسة، تم الحصول على الحصويات من أحد مجابل الشركة العامة للطرق محافظة اللاذقية.

تم إجراء الاختبارات الخاصة بتوصيف الحصويات وفقاً للمواصفات السورية للجسور والطرق الصادر في عام ٢٠٠٢، ونبين فيما يلي نتائج الاختبارات:

٣-٢-١- نتائج اختبار المكافئ الرملي:

الجدول (٣-١) نتائج اختبار المكافئ الرملي

أرقام أنابيب الاختبار	1	2	3
المستوى الأعلى للغضار	5.1	4.8	5.0
المستوى الأعلى للرمل	3.7	3.5	3.65
المكافئ الرملي %	72.6	73.1	73.0
المتوسط %	73.0		

٣-٢-٢- نتائج اختبار لوس أنجلوس:

لتحديد الفاقد بالاهتراء وفق لوس أنجلوس وبحسب نتائج التركيب الحبي استخدمنا /١٢/ كرة معدنية، وعدد الدورات /٥٠٠/ دورة، والنتائج مبينة كما يلي:

الجدول (٣-٢) نتائج اختبار لوس انجلوس

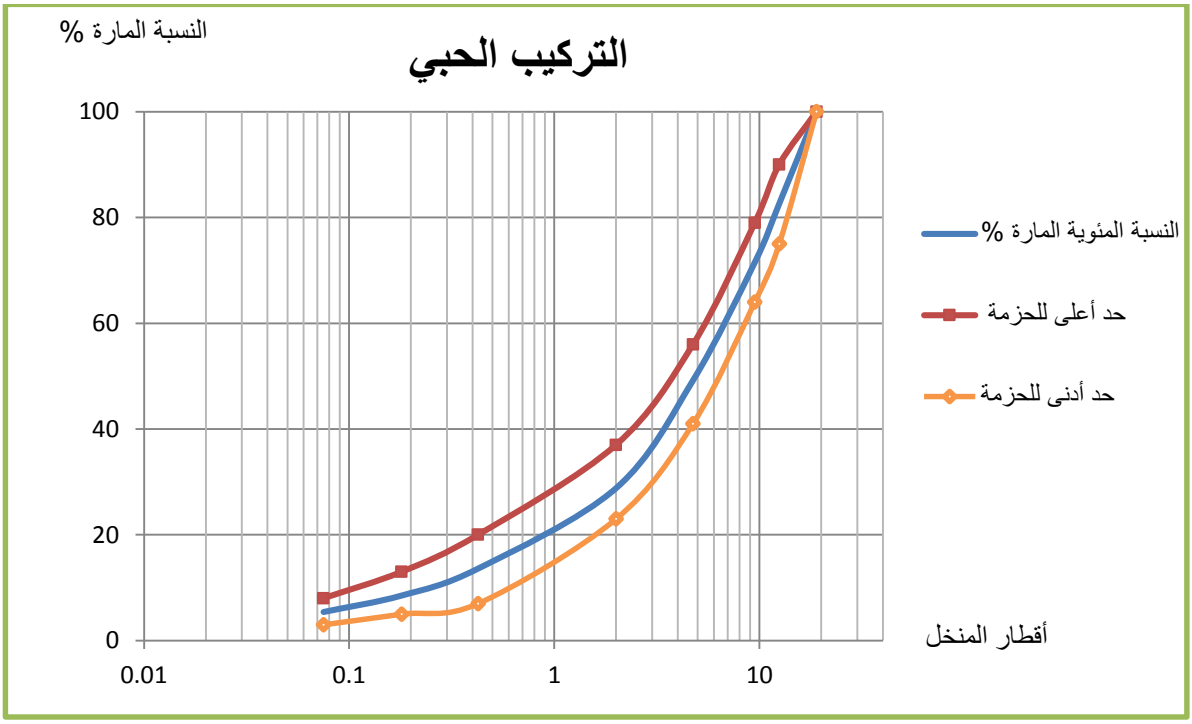
العينة	(١)	(٢)	(٣)
وزن قبل الاختبار gr	5000	5000	5000
وزن بعد الاختبار gr	3730	3655	3765
عامل اهتراء لوس أنجلوس %	25.4	26.9	24.7
الوسطي %	**25.67**		
القيمة النهائية	**% 26**		

٣-٢-٣- نتائج اختبار التركيب الحبي:

الجدول (٣-٣) نتائج التركيب الحبي والحزمة النظامية المعتمدة في الدراسة

أقطار المناخل mm	رقم المنخل Sieve No.	النسبة المئوية المارة %	الحزمة النظامية
١٩	3/4"	١٠٠	١٠٠
١٢،٥	1/2"	٨٢،٦	٩٠ - ٧٥
٩،٥	3/8"	٧١،٥	٧٩ - ٦٤
٤،٧٥	No.4	٤٩،٢	٥٦ - ٤١
٢	No.10	٢٨،٨	٣٧ - ٢٣
٠،٤٢٥	No.40	١٣،٦	٢٠ – ٧
٠،١٨٠	No.80	٨،٥	١٣ – ٥
٠،٠٧٥	No.200	٥،٤	٨ – ٣

نبين في الشكل (٢-٣) منحني التركيب الحبي مع توضيح الحد الأعلى والحد الأدنى للحزمة المعتمدة.



الشكل (٣-٢) منحني التركيب الحبي لعينة الحصويات المستخدمة في الدراسة

٣-٢-٤- نتائج اختبار امتصاص الماء:

الجدول (٣-٤) نتائج اختبار تشرب الماء للحصويات

أرقام الاختبار	1	2	3
وزن العينة جافة، gr	600.0	600.2	600.0
وزن العينة مشبعة والسطح جاف، gr	605.89	605.66	605.78
وزن الماء الممتص، gr	5.89	5.46	5.78
نسبة الماء الممتص %	0.982	0.910	0.963
وسطي امتصاص الماء %	**0.952**		

٣-٢-٥- نتائج اختبار الوزن النوعي:

الجدول (٣-٥) نتائج اختبار الوزن النوعي للحصويات

الوزن النوعي للحصويات المارة من المنخل 3/4 والمحجوزة على المنخل No.4	**2.605**
الوزن النوعي للحصويات المارة من المنخل No.4 والمحجوزة على المنخل N200	**2.669**
الوزن النوعي للحصويات المارة من المنخل N200	**2.753**

٣-٣- نتائج اختبارات توصيف الحصويات المعاد تدويرها RCA:

تم إحضار نواتج هدم البيتون RCA ثم طحنها باستخدام كسارة أوتوماتيكية، بحيث يتم توجيه عفاسات الكسارة لإنتاج حصويات من الكتل البيتونية لتحقيق التدرج الحبي المطلوب للخلطات الإسفلتية المعتمدة في المواصفات القياسية السورية بحيث لا تتجاوز حجم الحبة 19 mm.

الشكل (٣-٣) نفايات المواد البيتونية خلال عملية التكسير اليدوي

يبين الشكل (٣-٤) نموذج الكسارة الآلية التي تم استخدامها لتفتيت القطع البيتونية

الشكل (٣-٤) الكسارة الآلية المستخدمة لتفتيت كتل البيتون

ونبين فيما يلي نتائج الاختبارات التوصيفية الخاصة بالحصويات المعاد تدويرها:

٣-٣-١- نتائج اختبار المكافئ الرملي:

الجدول (٣-٦) نتائج اختبار المكافئ الرملي

أرقام انابيب الاختبار	1	2	3
المستوى الأعلى للغضار	5.0	4.9	5.1
المستوى الأعلى للرمل	4.2	4.3	4.4
المكافئ الرملي %	84.0	87.8	86.3
المتوسط %	86.0		

٣-٣-٢- نتائج اختبار لوس أنجلوس:

لتحديد الفاقد بالاهتراء وفق لوس أنجلوس وبحسب نتائج التركيب الحبي استخدمنا ١٢ كرة معدنية، و عدد الدورات /٥٠٠/ دورة، والنتائج مبينة كما يلي:

الجدول (٣-٧) نتائج اختبار لوس انجلوس

العينة	(١)	(٢)	(٣)
وزن قبل الاختبار gr	٥٠٠٠	٥٠٠٠	٥٠٠٠
وزن بعد الاختبار gr	٣١٥٠	٣١٩٠	٣١١٠
عامل اهتراء لوس أنجلوس %	٣٧،٠	٣٦،٢	٣٧،٨
الوسطي %	**٣٧،٠٠**		
القيمة النهائية	**%٣٧**		

٣-٣-٣- نتائج اختبار امتصاص الماء:

تم إجراء اختبار التشرب وامتصاص الماء على عينة من الحصويات المعاد تدويرها، ويلاحظ من النتائج ارتفاع نسبة امتصاص الماء مقارنة مع الحصويات الطبيعية، ويبين الجدول نتائج الاختبار

الجدول (٣-٨) نتائج اختبار تشرب الماء للحصويات

أرقام الاختبار	1	2	3
وزن العينة جافة، gr	1500	1500	1500
وزن العينة مشبعة والسطح جاف، gr	1566	1562	1575
وزن الماء الممتص، gr	66	62	75
نسبة الماء الممتص %	4.4	4.1	5.0
وسطي امتصاص الماء %	**4.5**		

٣-٣-٤- نتائج اختبار الوزن النوعي:

الجدول (٣-٩) نتائج اختبار الوزن النوعي للحصويات

الوزن النوعي للحصويات المارة من المنخل 3/4 والمحجوزة على المنخل No.4	**2.477**
الوزن النوعي للحصويات المارة من المنخل No.4 والمحجوزة على المنخل N200	**2.314**
الوزن النوعي للحصويات المارة من المنخل N200	**2.640**

نبين في الشكل نموذج لعينات من الحصويات الطبيعية والحصويات المعاد تدويرها بعد فرزها وتصنيفها بحسب الأقطار.

الحصويات الكلسية الطبيعية

الحصويات المعاد تدويرها

الشكل (٣-٥) نموذج لعينات من الحصويات المستخدمة في الدراسة

٣-٤- نتائج اختبارات الإسفلت التوصيفية:

تم استخدام نوع واحد من الإسفلت في إعداد عينات الدراسة. الإسفلت المستخدم لتصنيع عينات الدراسة هو إسفلت(٦٠-٧٠) تم الحصول عليه من مصفاة بانياس، وقمنا بمجموعة من الاختبارات لتوصيف الإسفلت المستخدم والتحقق من مطابقته للمواصفات الفنية المعمول بها، ونبين فيما يلي نتائج اختبارات عينات الإسفلت وفق المواصفات الفنية للجسور والطرق المعتمدة في سورية ٢٠٠٢ ووفقاً لمواصفات ASTM:

٣-٤-١- نتائج اختبار الغرز:

أجري اختبار الغرز على الإسفلت غير المعدل بدرجة الحرارة (25 °c) ووفق الشروط النظامية (100gr-5sec-0.1×mm)، ونبين فيما يلي نتائج الاختبار:

الجدول (٣-١٠) نتائج الغرز بدرجة حرارة (25 °c) لعينة الإسفلت

العينة	الأولى	الثانية	الثالثة
الغرز (١)	63	62	63
الغرز (٢)	64	63	66
الغرز (٣)	64	64	65
وسطي الغرز	64	63	65
وسطي العينات	**64**		

٣-٤-٢- نتائج اختبار الاستطالة:

أجريت تجارب الاستطالة على الإسفلت غير المعدل وفق الشروط النظامية الخاصة بالاختبار وهي درجة الحرارة (25 °c) وسرعة الشد 5cm/min ونبين فيما يلي نتائج الاختبار:

الجدول (٣-١١) نتائج اختبار الاستطالة

العينة الواحدة cm	الأولى	الثانية	الثالثة
الاستطالة (١)	106	110	108
الاستطالة (٢)	106	110	107
وسطي العينة	106	110	80
وسطي العينات	**108**		

٣-٤-٣- نتائج اختبار نقطة التميع (الكرة والحلقة):

لتحديد درجة التمييع قمنا باستخدام اختبار الكرة والحلقة (Ring&Ball) وفقاً لشروط سرعة تسخين (5 °c/min) والنتائج مبينة كما يلي:

الجدول (٣-١٢) نتائج اختبار نقطة التمييع للإسفلت

العينة درجة مئوية	الأولى	الثانية	الثالثة
الكرة (١)	٤٩،٥	٤٩،٥	٥٠
الكرة (٢)	٤٩،٥	٤٩،٦	٥٠
وسطي العينة	٤٩،٥	٤٩،٦	٥٠
وسطي العينات	٤٩،٧		

٣-٤-٤- نتائج اختبار نقطة الوميض والاشتعال:

يعدُّ تحديد نقطتي الوميض والاشتعال للإسفلت ذا أهمية خاصة في مجال سلامة العمال في المجابل وفي أثناء التنفيذ، ونبين فيما يلي تحديد درجة حرارة نقطة الوميض والاشتعال لعينات الإسفلت المستخدم في الدراسة.

الجدول (٣-١٣) نتائج اختبار نقطتي الوميض والاشتعال

العينة درجة مئوية	درجة الوميض	درجة الاشتعال
العينة (١)	٢٤٥	٢٥٩
العينة (٢)	٢٤٦	٢٥٧
العينة (٣)	٢٤٤	٢٥٨
وسطي	٢٤٥	٢٥٨

٣-٤-٥- نتائج اختبار الفاقد بالحرارة:

باستخدام الفرن الخاص بالفاقد بالحرارة الدوار RTOFT قمنا بتعريض عينات الإسفلت لدرجة حرارة (163 °c) ولمدة (٥ ساعات) وتم تحديد النتائج كما يلي:

الجدول (٣-١٤) نتائج اختبار الفاقد بالحرارة لعينة الإسفلت

العينة	الأولى	الثانية	الثالثة
وزن الوعاء فارغ gr	50.0	49.6	0.50

وزن العينة gr	50	50	50
وزن الوعاء مع العينة قبل التسخين gr	100.0	99.6	100.2
وزن الوعاء مع العينة بعد التسخين gr	99.66	99.27	99.86
الفاقد %	0.68	0.67	0.68
وسطي العينات %	**0.68**		

من نتائج الاختبارات السابقة نجد أن الإسفلت المختبر محقق لمواصفات الرابط الإسفلتي ٧٠/٦٠ المستخدم في تصميم الخلائط الإسفلتية في سورية، ونعرض في الشكل صور من اختبارات الإسفلت

اختبار الاستطالة

اختبار نقطة التمييع

اختبار نقطتي الوميض والاشتعال

الشكل (٣-٦) نماذج من اختبارات الرابط الإسفلتي

٣-٥- نتائج تصميم الخلائط الإسفلتية:

بعد القيام بتوصيف الإسفلت والحصويات الطبيعية والمعاد تدويرها والتحقق من مواصفاتها الفنية، وبحسب المنهجية المبينة في مقدمة الفصل الثالث، نبين فيما يلي نتائج تصميم الخلطة الإسفلتية المرجعية باستخدام الحصويات الطبيعية فقط والخلائط الإسفلتية المعدلة والتي تم استبدال نسب من الحصويات الطبيعية بالحصويات المعاد تدويرها وذلك باستخدام طريقة مارشال المعتمدة في سورية لتصميم الخلائط الإسفلتية.

نبين فيما يلي الرموز المعتمدة الخاصة بأسماء الخلائط الإسفلتية:

RCA 0%: الخلطة الإسفلتية المرجعية المصممة باستخدام الحصويات الطبيعية فقط (١٠٠% حصويات طبيعية، و ٠% حصويات معاد تدويرها).

RCA 25%: الخلطة الإسفلتية المرجعية المصممة باستبدال نسبة (٢٥%) من RCA (٧٥% حصويات طبيعية، و ٢٥% حصويات معاد تدويرها).

RCA 50%: الخلطة الإسفلتية المرجعية المصممة باستبدال نسبة (٥٠%) من RCA (٥٠% حصويات طبيعية، و ٥٠% حصويات معاد تدويرها).

RCA 60%: الخلطة الإسفلتية المرجعية المصممة باستبدال نسبة (٦٠%) من RCA (٤٠% حصويات طبيعية، و ٦٠% حصويات معاد تدويرها).

٣-٥-١- نتائج تصميم الخلطة الإسفلتية المرجعية (RCA 0%):

من الحصويات المحققة للحزمة المطلوبة وبعد التسخين إلى درجة الحرارة الكافية لتجفيف الحصويات من الرطوبة الطبيعية (يعتمد درجة حرارة /٢٠٠/ درجة مئوية للتجفيف)، يتم إضافة الرابط الإسفلتي المسخن (يتم تسخين الإسفلت إلى اللزوجة الكافية لتغليف الحصويات بالكامل) بالنسب التالية وزناً (٤،٠-٤،٥-٥،٠-٥،٥-٦،٠%)، نقوم بتحديد الأوزان اللازمة لكل خلطة ومن ثم خلط الحصويات مع الإسفلت ضمن قالب خلاط آلي مخصص لذلك بحيث يتم إعداد ثلاثة قوالب من قوالب مارشال (أبعاد القالب النظامية قطر /٤/ انش، ارتفاع /٢،٥/ انش) لكل نسبة وفق المتطلبات الفنية لطريقة مارشال بحيث تم تشكيل /١٥/ قالباً بـ /٧٥/ طرقة على كل وجه، وفي اليوم التالي يتم إخراج العينات من القالب وتحديد كثافتها وكل من الثبات والانسياب وكافة عناصر مارشال.

الشكل (٣-٧) يوضح القالب وجهاز الرص وعينة خلطة إسفلتية مرصوصة.

الشكل (٣-٧) قالب مارشال وجهاز رص العينات

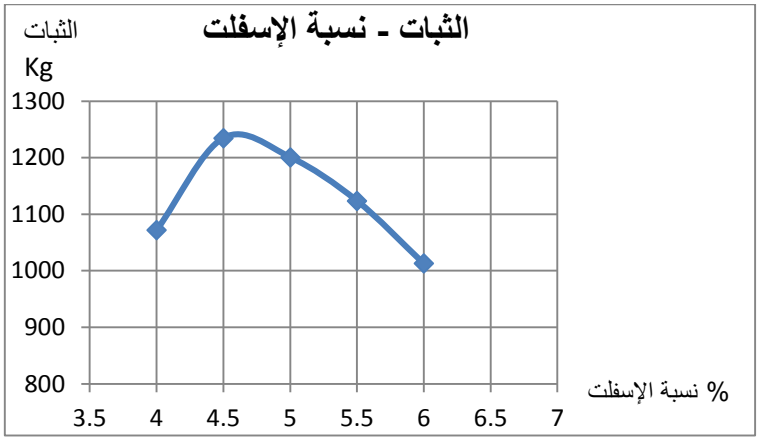
قيمة الثبات والانسياب لكل خلطة يتم تحديدها عبر جهاز مارشال، ويتم أخذ متوسط قيم الكسر والانسياب، أما بالنسبة لقيم الفراغات فيتم حسابها اعتماداً على كثافة مارشال والكثافة الأعظمية، يبين الجدول متوسط نتائج بارمترات مارشال الخاصة بالخلطة المرجعية.

الجدول (٣-١٥) نتائج تصميم الخلطة الإسفلتية المرجعية (RCA 0%)

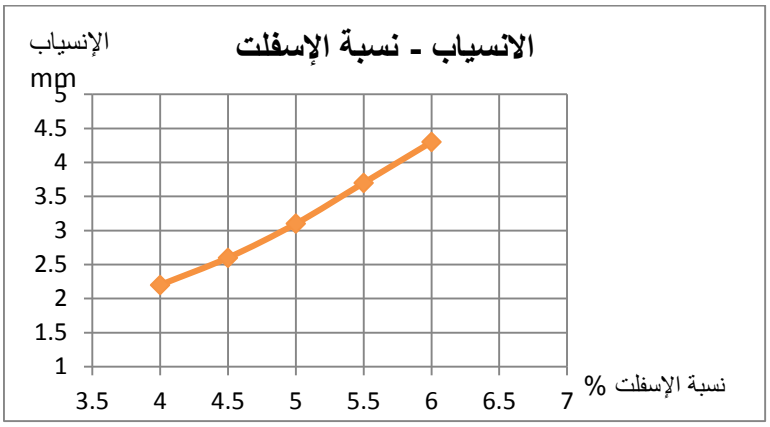
نسبة الإسفلت %	كثافة مارشال gr/cm^3	الفراغات الملیئة %	الفراغات الهوائية %	الثبات Kg	الانسياب mm
4.0	2.327	59.4	6.2	1072	2.2
4.5	2.335	66.3	5.2	1235	2.6
5.0	2.330	70.7	4.7	1201	3.1

3.7	1124	4.2	74.5	2.324	5.5
4.3	1013	3.8	78.2	2.319	6.0
الوزن النوعي للإسفلت 10.3			الوزن النوعي للحصويات 2.635		

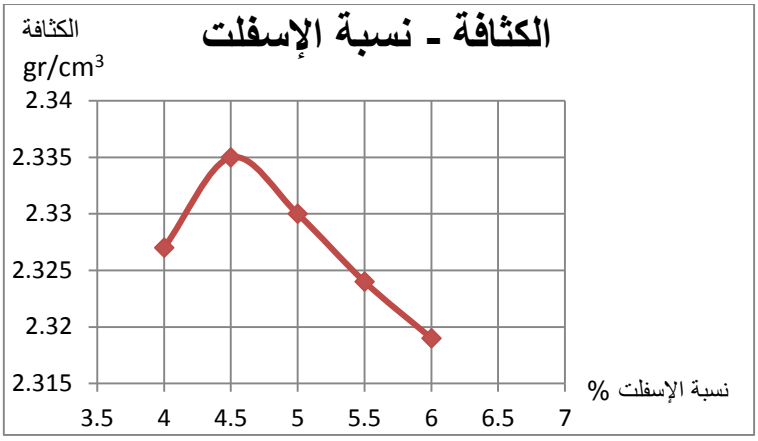
يتم تحديد نسبة الإسفلت المثالية الخاصة بالخلطة الإسفلتية بعد رسم منحنيات مارشال والتي تمثل العلاقة بين نسبة الإسفلت وكل من الثبات، الانسياب، الكثافة، نسبة الفراغات الهوائية والمليئة، والنتائج مبينة في الأشكال التالية:



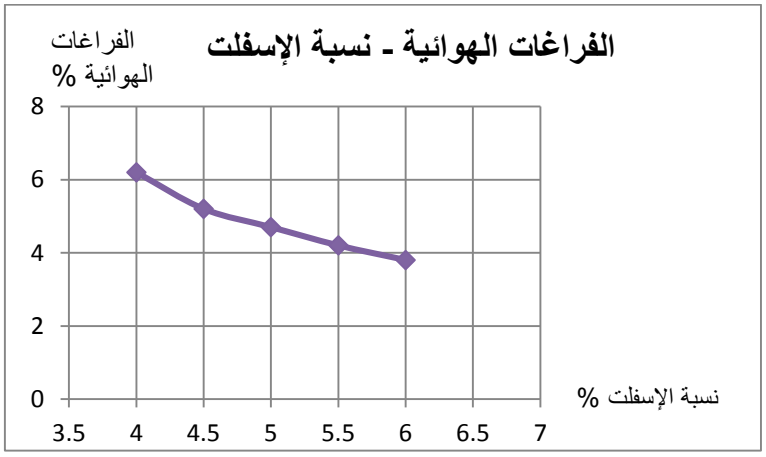
الشكل (٣-٨) العلاقة بين نسبة الإسفلت والثبات للخلطة (RCA 0%)



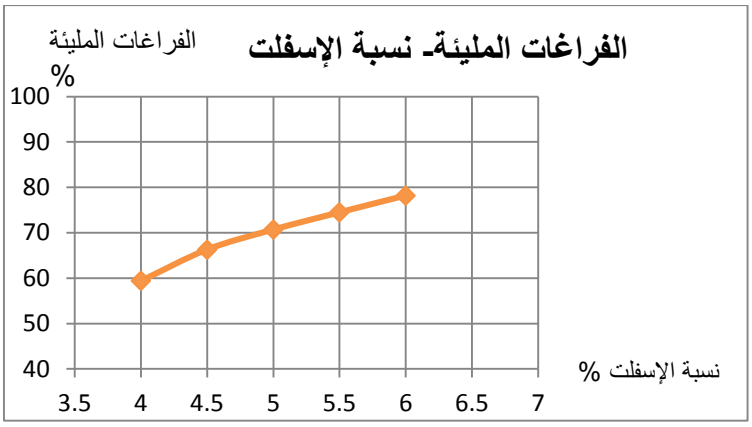
الشكل (٣-٩) العلاقة بين نسبة الإسفلت والانسياب للخلطة (RCA 0%)



الشكل (٣-١٠) العلاقة بين نسبة الإسفلت والكثافة للخلطة (RCA 0%)



الشكل (٣-١١) العلاقة بين نسبة الإسفلت والفراغات الهوائية للخلطة (RCA 0%)



الشكل (٣-١٢) العلاقة بين نسبة الإسفلت والفراغات المليئة للخلطة (RCA 0%)

بالاعتماد على منحنيات مارشال (الثبات، الانسياب، الكثافة، الفراغات الهوائية والمليئة) تم تحديد نسبة الإسفلت المثالية ونبين في الجدول (٣-١٦) خصائص الخلطة الإسفلتية التصميمة،

باعتماد نسبة إسفلت أصولية (٤،٦ %) كمتوسط لنسبة الإسفلت التي تحقق أكبر قيمة للثبات ونسبة إسفلت محققة لكثافة أعظمية ونسبة فراغات هوائية (٤%).

الجدول(٣-١٦) خصائص الخلطة الإسفلتية التصميمة

الخاصة	القيمة	الحدود المسموحة وفق المواصفات السورية
نسبة الإسفلت المثالية %	4.6	-
الثبات (Kg)	1230	1100<
الانسياب (mm)	2.3	2 – 4
الكثافة (gr/cm^3)	2.332	-
نسبة الفراغات الهوائية (%)	4.7	3 – 5
نسبة الفراغات المليئة (%)	70.1	65-85

٣-٥-٢- نتائج تصميم الخلطة الإسفلتية (RCA 25%):

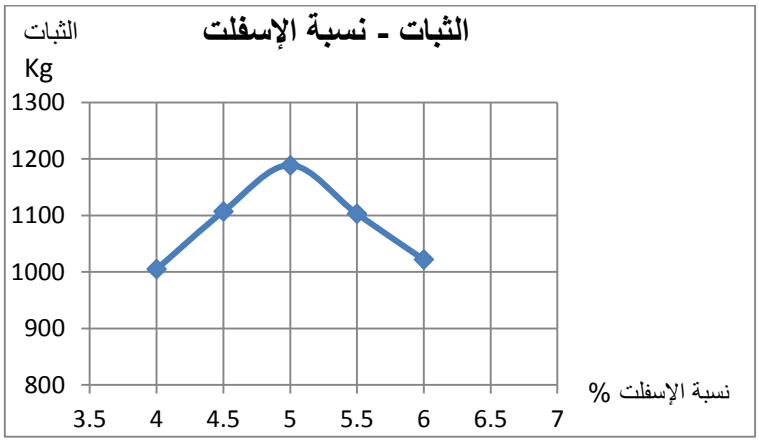
بعد القيام باستبدال نسبة (25%) من الحصويات الطبيعية بحصويات معاد تدويرها والباقي يتم استخدام حصويات طبيعية، والتحقق من التركيب الحبي للحصويات المطلوبة، يتم تسخين هذه الحصويات وتجفيفها من الرطوبة للقيام بتصميم الخلطة الإسفلتية وفق طريقة مارشال وبنفس نسب الإسفلت المستخدمة في الخلطة المرجعية، ويبين الجدول نتائج التصميم.

الجدول (٣-١٧) نتائج تصميم الخلطة الإسفلتية (RCA 25%)

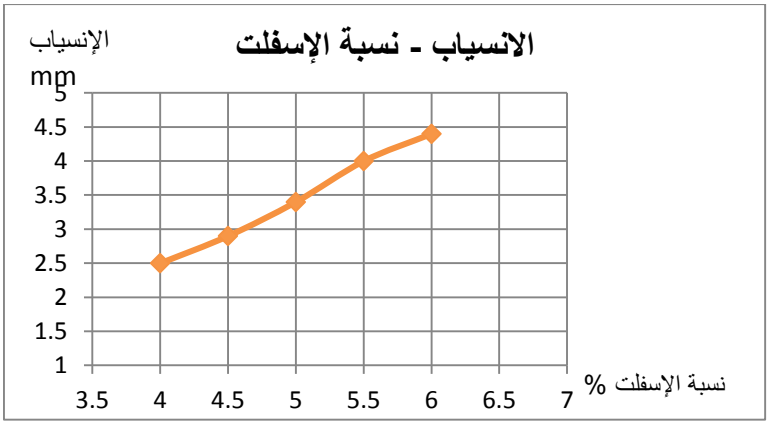
نسبة الإسفلت %	كثافة مارشال gr/cm^3	الفراغات المليئة %	الفراغات الهوائية %	الثبات Kg	الانسياب mm
4.0	2.285	57.5	6.6	1005	2.5
4.5	2.301	65.8	5.2	1107	2.9
5.0	2.317	74.3	3.9	1189	3.4
5.5	2.312	78.2	3.4	1103	4.0

6.0	2.307	81.9	3.0	1022	4.4
الوزن النوعي للحصويات 2.594			الوزن النوعي للإسفلت 10.3		

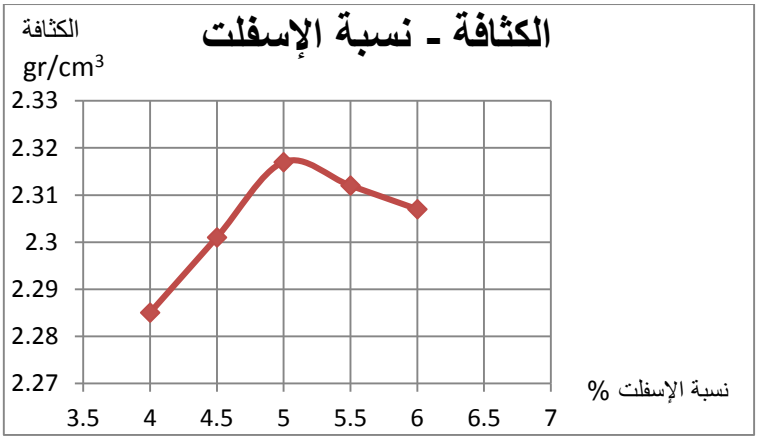
يتم تحديد نسبة الإسفلت المثالية الخاصة بالخلطة الإسفلتية المعدلة بنسبة /25%/ من الحصويات المعاد تدويرها بعد رسم منحنيات مارشال والتي تمثل العلاقة بين نسبة الإسفلت وكل من الثبات، الانسياب، الكثافة، نسبة الفراغات الهوائية والمليئة، والنتائج مبينة في الأشكال التالية:



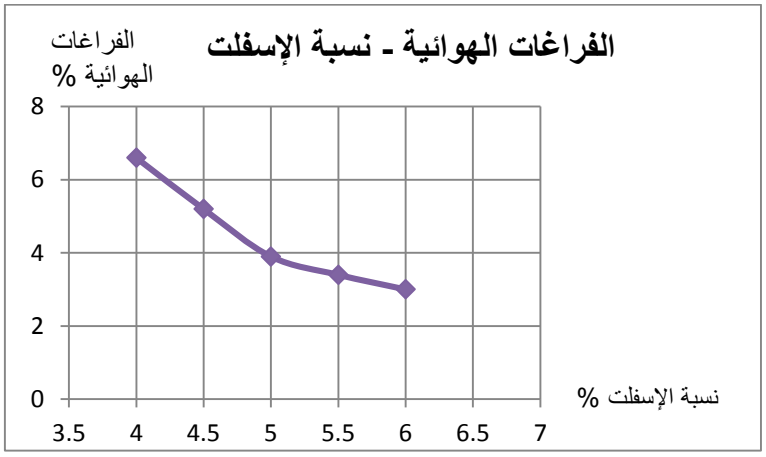
الشكل (٣-١٣) العلاقة بين نسبة الإسفلت والثبات للخلطة (RCA 25%)



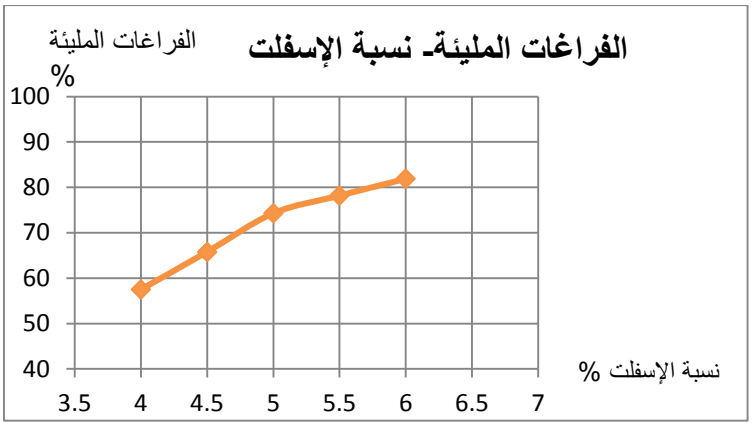
الشكل (٣-١٤) العلاقة بين نسبة الإسفلت والانسياب للخلطة (RCA 25%)



الشكل (٣-١٥) العلاقة بين نسبة الإسفلت والكثافة للخلطة (RCA 25%)



الشكل (٣-١٦) العلاقة بين نسبة الإسفلت والفراغات الهوائية للخلطة (RCA 25%)



الشكل (٣-١٧) العلاقة بين نسبة الإسفلت والفراغات المليئة للخلطة (RCA 25%)

بالعودة إلى الجدول (٣-١٧) والأشكال السابقة نجد أن متطلبات خواص الخلطة الإسفلتية المصممة وفق طريقة مارشال بالرابط الإسفلتي الأولي محققة للمتطلبات الفنية المنصوص عليها في المواصفات العامة للطرق والجسور من ثبات وانسياب وفراغات هوائية وفراغات مليئة.

وتم اعتماد نسبة الإسفلت المثالية /4.4%/ كمتوسط لنسبة الإسفلت التي تحقق ثباتاً أعظمياً، ونسبة الإسفلت المحققة لكثافة مارشال الأعظمية، ونسبة الإسفلت المقابلة /4%/ وهي متوسط لحدود الفراغات الهوائية المطلوبة بمجال /5-3%/.

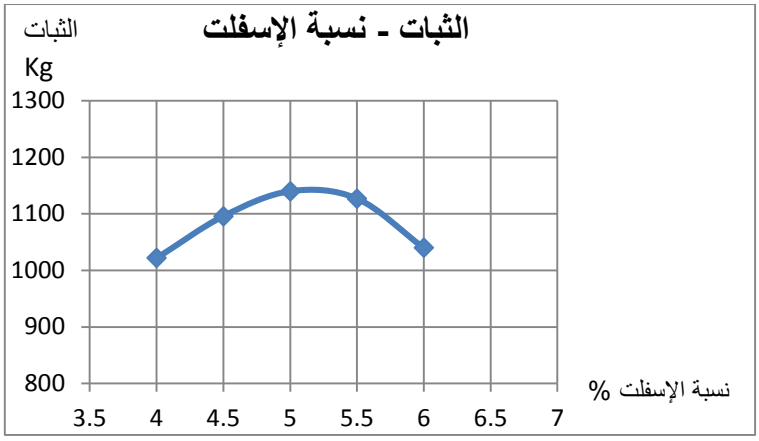
٣-٥-٣- نتائج تصميم الخلطة الإسفلتية (RCA 50%):

بعد القيام باستبدال نسبة /50%/ من الحصويات الطبيعية بحصويات معاد تدويرها والباقي يتم استخدام حصويات طبيعية، والتحقق من التركيب الحبي للحصويات المطلوبة، يتم تسخين هذه الحصويات وتجفيفها من الرطوبة للقيام بتصميم الخلطة الإسفلتية وفق طريقة مارشال وبنفس نسب الإسفلت المستخدمة في الخلطة المرجعية، ويبين الجدول نتائج التصميم.

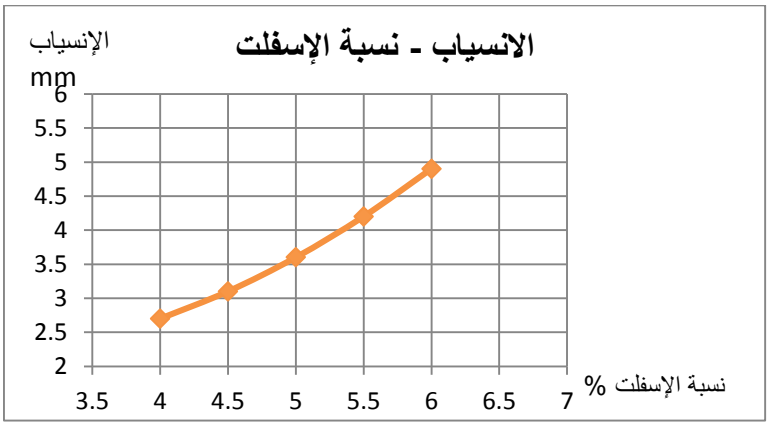
الجدول (٣-١٨) نتائج تصميم الخلطة الإسفلتية (RCA 50%)

نسبة الإسفلت %	كثافة مارشال gr/cm^3	الفراغات المليئة %	الفراغات الهوائية %	الثبات Kg	الانسياب mm
4.0	2.273	57.0	6.7	1022	2.7
4.5	2.289	65.2	5.3	1096	3.1
5.0	2.297	72.0	4.3	1140	3.6
5.5	2.288	75.1	4.0	1127	4.2
6.0	2.279	78.0	3.8	1040	4.9
الوزن النوعي للحصويات 2.582			الوزن النوعي للإسفلت 10.3		

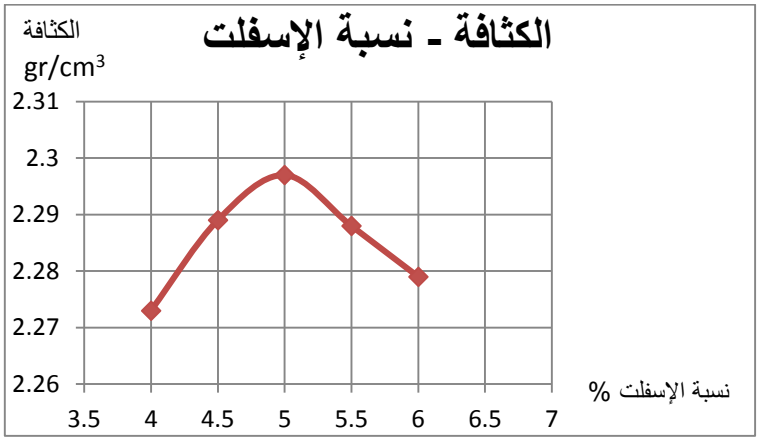
يتم تحديد نسبة الإسفلت المثالية الخاصة بالخلطة الإسفلتية المعدلة بنسبة /٥٠%/ من الحصويات المعاد تدويرها بعد رسم منحنيات مارشال والتي تمثل العلاقة بين نسبة الإسفلت وكل من الثبات، الانسياب، الكثافة، نسبة الفراغات الهوائية والمليئة، والنتائج مبينة في الأشكال التالية:



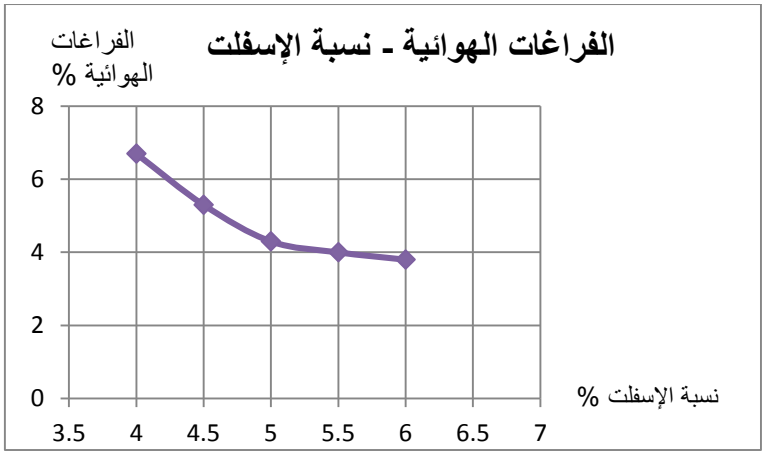
الشكل (٣-١٨) العلاقة بين نسبة الإسفلت والثبات للخلطة (RCA 50%)



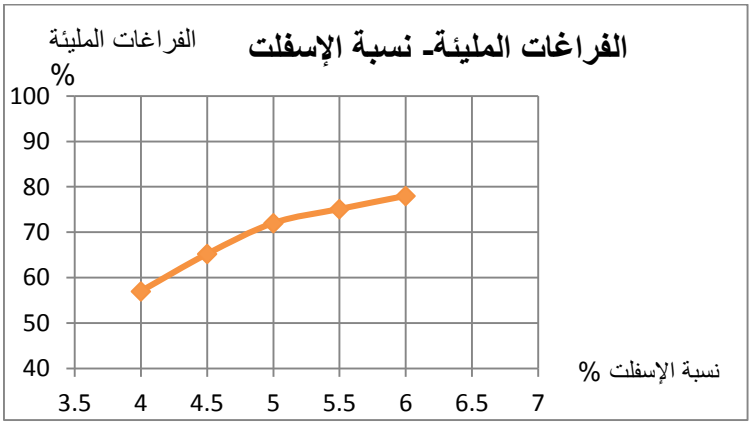
الشكل (٣-١٩) العلاقة بين نسبة الإسفلت والانسياب للخلطة (RCA 50%)



الشكل (٣-٢٠) العلاقة بين نسبة الإسفلت والكثافة للخلطة (RCA 50%)



الشكل (٣-٢١) العلاقة بين نسبة الإسفلت والفراغات الهوائية للخلطة (RCA 50%)



الشكل (٣-٢٢) العلاقة بين نسبة الإسفلت والفراغات المليئة للخلطة (RCA 50%)

بالعودة إلى الجدول (٣-١٨) والأشكال السابقة نجد أن متطلبات خواص الخلطة الإسفلتية المصممة وفق طريقة مارشال بالرابط الإسفلتي الأولي محققة للمتطلبات الفنية المنصوص عليها في المواصفات العامة للطرق والجسور من ثبات وانسياب وفراغات هوائية وفراغات مليئة.

وتم اعتماد نسبة الإسفلت المثالية (٥،٤ %) كمتوسط لنسبة الإسفلت التي تحقق ثباتاً أعظمياً، ونسبة الإسفلت المحققة لكثافة مارشال الأعظمية ونسبة الإسفلت المقابلة (٤%) وهي متوسط لحدود الفراغات الهوائية المطلوبة بمجال (٣-٥ %).

٣-٥-٤- نتائج تصميم الخلطة الإسفلتية (RCA 60%):

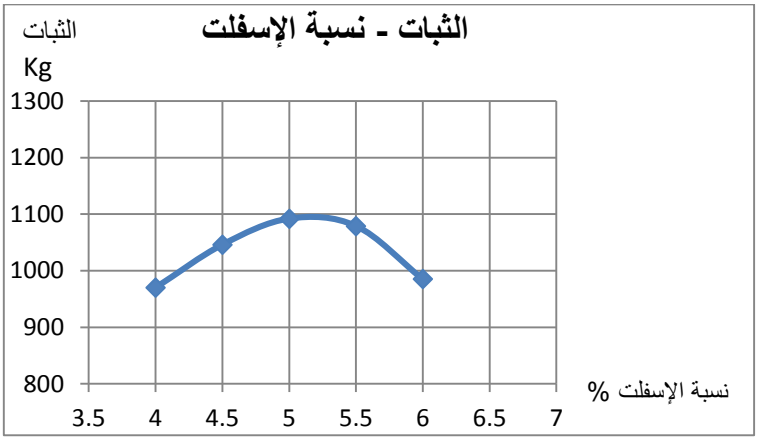
بعد القيام باستبدال نسبة /60%/ من الحصويات الطبيعية بحصويات معاد تدويرها والباقي يتم استخدام حصويات طبيعية، والتحقق من التركيب الحبي للحصويات المطلوبة، يتم تسخين هذه

الحصويات وتجفيفها من الرطوبة للقيام بتصميم الخلطة الإسفلتية وفق طريقة مارشال وبنفس نسب الإسفلت المستخدمة في الخلطة المرجعية، ويبين الجدول نتائج التصميم.

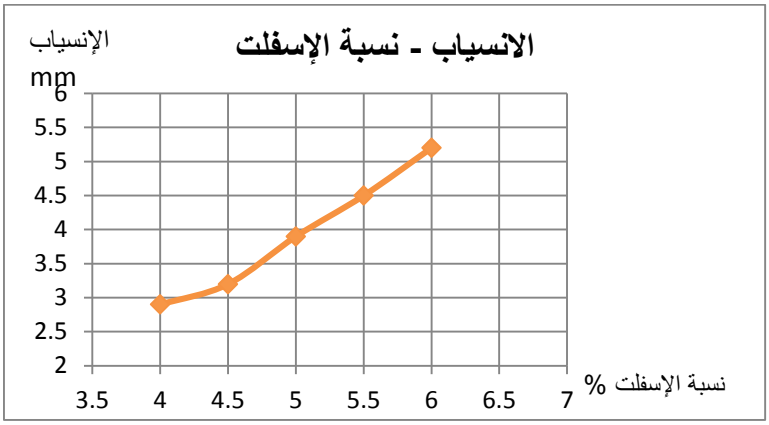
الجدول (٣-١٩) نتائج تصميم الخلطة الإسفلتية (RCA 60%)

نسبة الإسفلت %	كثافة مارشال gr/cm^3	الفراغات المليئة %	الفراغات الهوائية %	الثبات Kg	الانسياب mm
4.0	2.243	52.7	7.8	970	2.9
4.5	2.259	60.3	6.5	1046	3.2
5.0	2.296	72.1	4.3	1092	3.9
5.5	2.298	77.5	3.6	1079	4.5
6.0	٢.٢٨٣	79.1	3.5	985	5.2
الوزن النوعي للحصويات 2.580			الوزن النوعي للإسفلت 10.3		

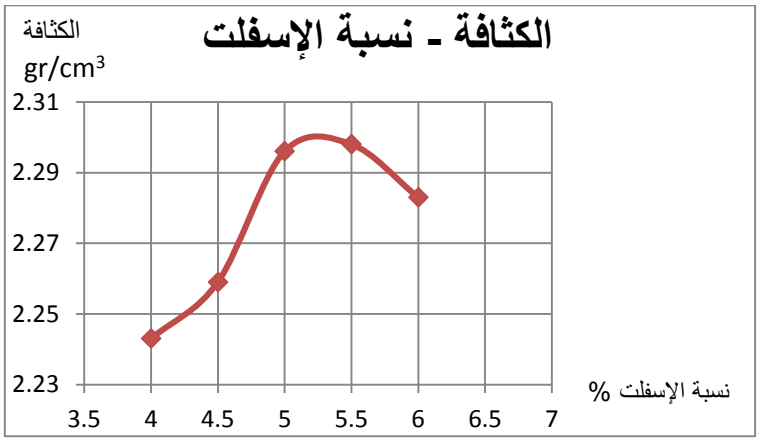
يتم تحديد نسبة الإسفلت المثالية الخاصة بالخلطة الإسفلتية المعدلة بنسبة /٥٠%/ من الحصويات المعاد تدويرها بعد رسم منحنيات مارشال والتي تمثل العلاقة بين نسبة الإسفلت وكل من الثبات، الانسياب، الكثافة، نسبة الفراغات الهوائية والمليئة، والنتائج مبينة في الأشكال التالية:



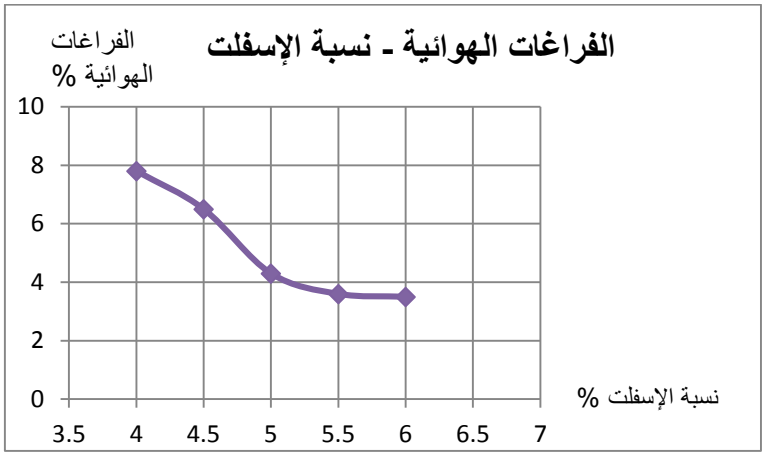
الشكل (٣-٢٣) العلاقة بين نسبة الإسفلت والثبات للخلطة (RCA 60%)



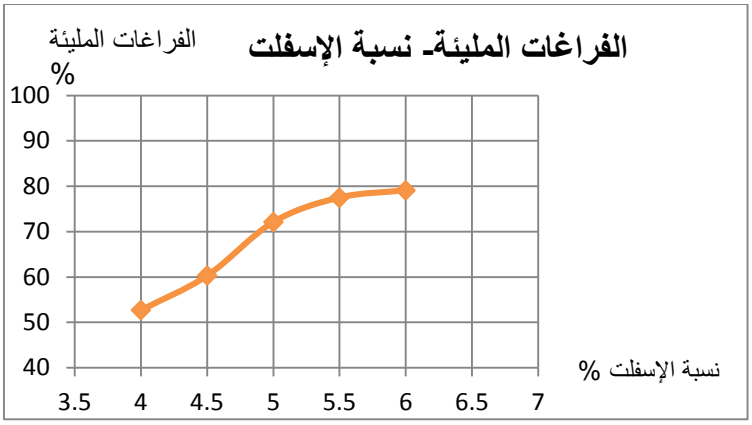
الشكل (٣-٢٤) العلاقة بين نسبة الإسفلت والانسياب للخلطة (RCA 60%)



الشكل (٣-٢٥) العلاقة بين نسبة الإسفلت والكثافة للخلطة (RCA 60%)



الشكل (٣-٢٦) العلاقة بين نسبة الإسفلت والفراغات الهوائية للخلطة (RCA 60%)



الشكل (٣-٢٧) العلاقة بين نسبة الإسفلت والفراغات المليئة للخلطة (RCA 60%)

بالعودة إلى الجدول (٣-١٩) والأشكال السابقة نجد أن متطلبات خواص الخلطة الإسفلتية المصممة وفق طريقة مارشال بالرابط الإسفلتي الأولي محققة للمتطلبات الفنية المنصوص عليها في المواصفات العامة للطرق والجسور من ثبات وانسياب، وفراغات هوائية، وفراغات مليئة.

وتم اعتماد نسبة الإسفلت المثالية /٥،٥ %/ كمتوسط لنسبة الإسفلت التي تحقق ثباتاً أعظمياً ونسبة الإسفلت المحققة لكثافة مارشال الأعظمية، ونسبة الإسفلت المقابلة /٤%/ وهي متوسط لحدود الفراغات الهوائية المطلوبة بمجال (٣-٥ %).

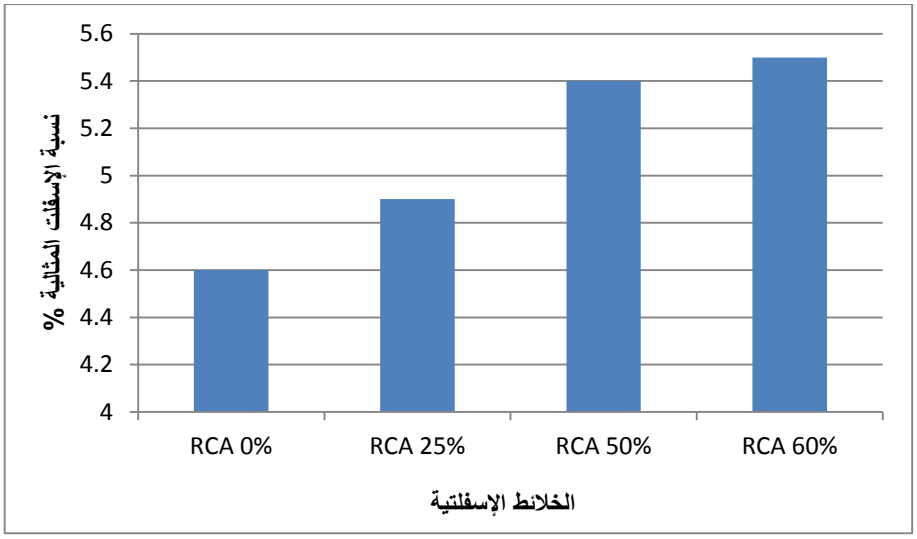
٣-٦- مناقشة نتائج تصميم الخلائط الإسفلتية:

بعد القيام بتصميم الخلائط الإسفلتية المرجعية المكونة فقط من الحصويات الطبيعية والخلائط الإسفلتية المعدلة بنسب مختلفة من الحصويات المعاد تدويرها RCA، ويبين الجدول ملخص نتائج تصميم الخلائط الإسفلتية.

الجدول (٣-٢٠) ملخص نتائج تصميم الخلطات الإسفلتية

الخلطة	RCA 0%	RCA 25%	RCA 50%	RCA 60%
نسبة الإسفلت المثالية %	4.6	4.9	5.4	5.5
الثبات Kg	1230	1181	1130	1079
الانسياب mm	2.3	3.3	4.1	4.5
الكثافة gr/cm^3	2.332	2.315	2.294	2.298
الفراغات الهوائية %	4.7	4.0	3.9	3.6
الفراغات المليئة %	70.1	72.6	74.5	77.5

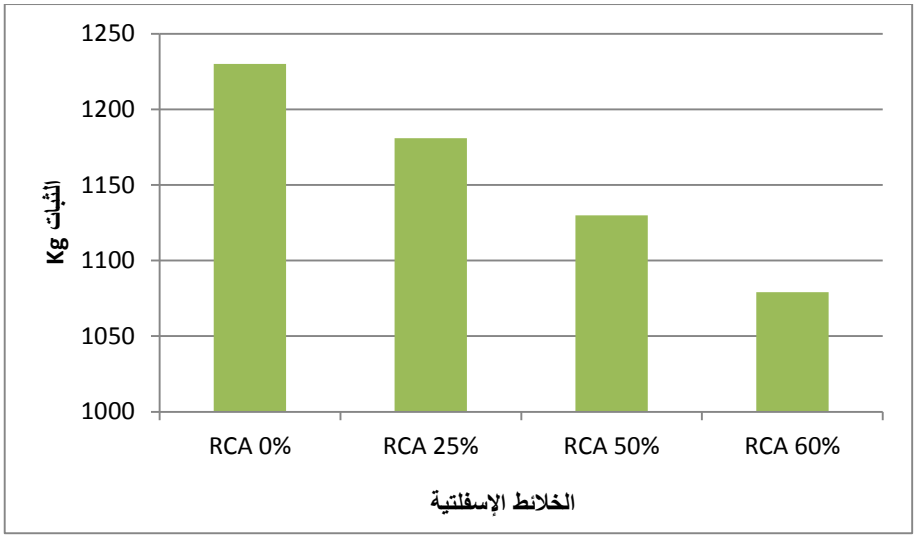
يلاحظ من النتائج ازدياد نسبة الإسفلت المثالية بزيادة نسبة التعديل من الحصويات المعاد تدويرها ويبين الشكل العلاقة بين نسب التعديل ونسبة الإسفلت المثالية.



الشكل (٣-٢٨) العلاقة بين نسب التعديل بالحصويات المعاد تدويرها ونسبة الإسفلت المثالية

يلاحظ من الشكل (٣-٢٨) أن نسبة الإسفلت المثالية تزداد بازدياد نسبة التعديل من الحصويات المعاد تدويرها، حيث ازدادت نسبة الإسفلت بنسبة /6.52%/ عن الخلطة المرجعية عند التعديل (RCA 25%)، وازدادت بنسبة /17.4%/ عن الخلطة المرجعية عند التعديل (RCA 50%)، وعند التعديل بالخلطة (RCA 50%) ازدادت نسبة الإسفلت بنسبة /19.6%/ ويعود سبب الزيادة إلى الامتصاصية المرتفعة للحصويات المعاد تدويرها حيث تتشرب نسبة من الإسفلت مقارنة مع الحصويات الكلسية وهذا ما يجعل النسبة ترتفع بزيادة نسبة التعديل.

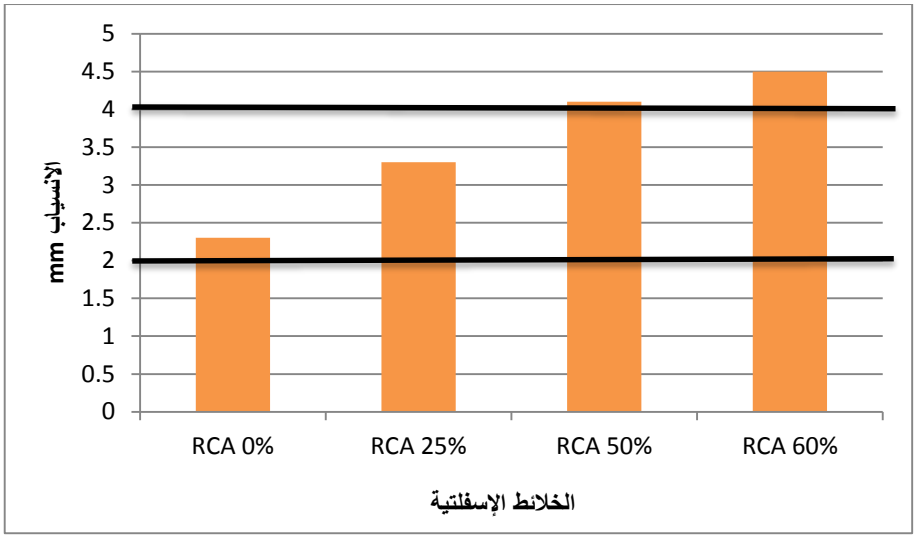
ومع زيادة نسبة الإسفلت المثالية يلاحظ انخفاض في ثبات مارشال للخلائط الإسفلتية بزيادة نسبة التعديل من الحصويات المعاد تدويرها ولكن بقيت جميع القيم ضمن الحدود المسموحة المحققة للمواصفات الفنية ويبين الشكل العلاقة بين الثبات ونسب التعديل من RCA.



الشكل (٣-٢٩) العلاقة بين نسب التعديل بالحصويات المعاد تدويرها والثبات

بلغت قيمة الثبات للخلطة المرجعية بدون تعديل (1230 kg) ومع التعديل بالحصويات المعاد تدويرها انخفضت قيم الثبات بنسبة /4%/ عن الخلطة المرجعية عند التعديل (RCA 25%)، وانخفضت بنسبة /8.2%/ عن الخلطة المرجعية عند التعديل (RCA 50%)، وعند التعديل بالخلطة (RCA 50%) انخفض الثبات بنسبة /12.3%/، وعلى الرغم من أن نسب الانخفاض ليست بالنسب الكبيرة لكن يلاحظ أن قيم الثبات قاربت الخروج عن حدود المواصفة المسموحة عند التعديل (RCA 60%)، ويمكن أن نرجع هذا الانخفاض إلى نقصان كثافة الخلائط المعدلة وزيادة نسب الإسفلت والذي يصبح عاملاً سلبياً يساعد على انزلاق الحبات الحصويات وعدم تماسكها وبالتالي يؤدي ذلك إلى انخفاض ثبات الخلائط الإسفلتية.

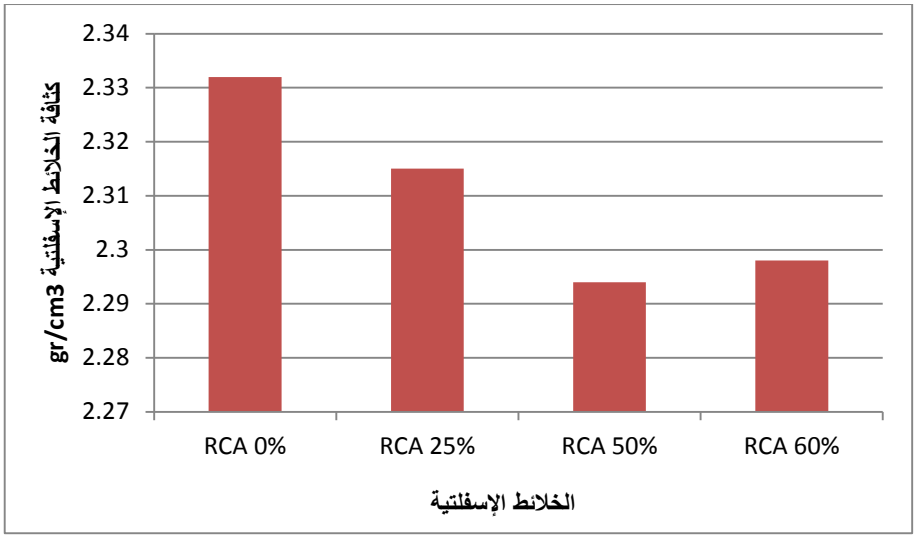
يرافق انخفاض ثبات الخلائط الإسفلتية زيادة في انسيابها (التشوه الشاقولي لحظة كسر العينة) ويعود ذلك إلى زيادة نسبة الإسفلت المثالية وضعف في ثبات الخلائط المعدلة إلى حد ما، حيث ازدادت نسبة الانسياب (43.5%) عند التعديل بالخلطة (RCA 25%)، وعند التعديل (RCA 50%) ازدادت نسبة الانسياب (78.3%) وخرجت عن حدود المواصفة المسموحة ولكن بشكل طفيف، وكذلك عند التعديل (RCA 60%) فقد ارتفعت نسبة الزيادة إلى (95.4%) وأصبحت القيمة خارج المواصفة بشكل واضح كما هو مبين في الشكل (٣-٣٠).



الشكل (٣-٣٠) العلاقة بين نسب التعديل بالحصويات المعاد تدويرها والانسياب

بما يتعلق بكثافة الخلائط الإسفلتية المصممة، فقد سجلت الخلطة المرجعية أعلى قيمة كثافة وهذا يعود لنوع الحصويات الكلسية المستخدمة وارتفاع الوزن النوعي الفعال لها، وعند التعديل بنسب من الحصويات المعاد تدويرها فقد انخفضت كثافة الخلائط الإسفلتية مع زيادة نسبة التعديل كما هو مبين في الشكل (٣-٣١).

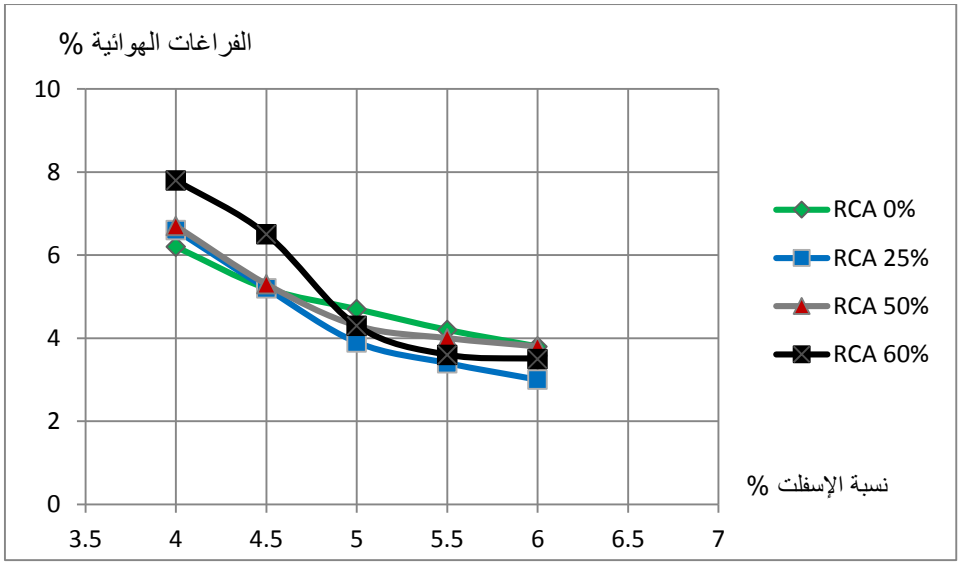
حيث يلاحظ أن كثافة الخلطات انخفضت بازدياد نسبة التعديل من الحصويات المعاد تدويرها، حيث انخفضت بنسبة أقل من /1%/ عن الخلطة المرجعية عند التعديل (RCA 25%)، وانخفضت بنسبة /1.63%/ عن الخلطة المرجعية عند التعديل (RCA 50%)، وعند التعديل بالخلطة (RCA 60%) عادت وارتفعت قيمة الكثافة وأصبحت نسبة الانخفاض /1.5%/ ويعود سبب الانخفاض إلى انخفاض الوزن النوعي للحصويات المعاد تدويرها عن الحصويات الطبيعية



الشكل (٣-٣١) العلاقة بين نسب التعديل بالحصويات المعاد تدويرها والكثافة

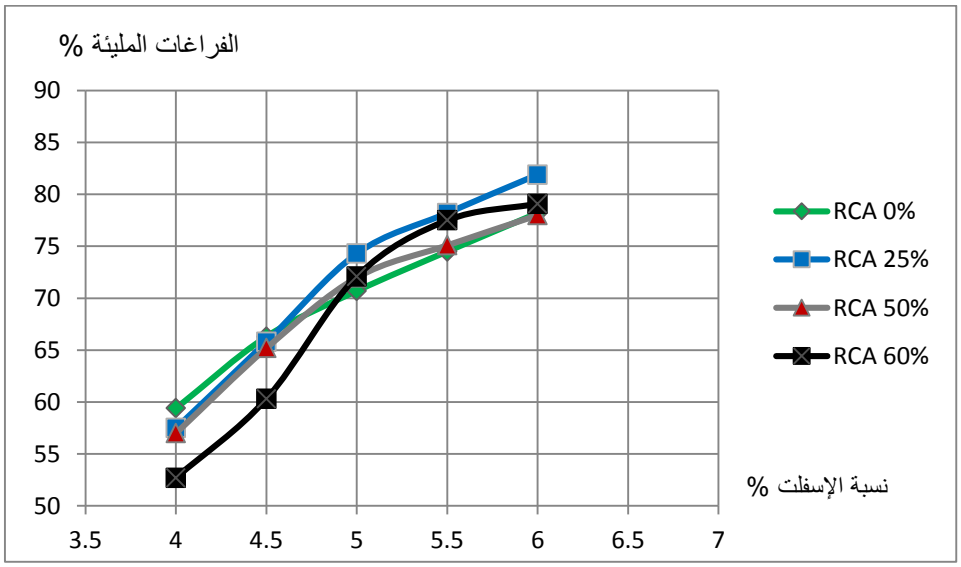
أما بالنسبة للفراغات الهوائية فقد انخفضت نسب الفراغات الهوائية بزيادة نسبة الإسفلت في كافة الخلائط الإسفلتية المصممة مع اختلاف القيم في كل خلطة، حيث إن الخلطة (RCA 60%) كان لها أكبر نسب من الفراغات الهوائية مقارنة مع باقي الخلطات وتنخفض نسبة الفراغات مع زيادة نسبة الإسفلت كما هو مبين في الشكل (٣-٣٢)، وعند نتائج التصميم النهائي يلاحظ انخفاض نسبة الفراغات الهوائية /14.9%/ عن الخلطة المرجعية عند التعديل (RCA 25%)، وانخفضت بنسبة (17%) عن الخلطة المرجعية عند التعديل (RCA 50%)، وعند التعديل بالخلطة (RCA 60%) انخفضت الفراغات الهوائية بنسبة (23.4%) مع بقاء نسب الفراغات الهوائية ضمن الحدود المسموحة.

يبين الشكل (٣-٣٣) العلاقة بين نسبة الإسفلت ونسب الفراغات المليئة بالإسفلت VFA للخلائط المعدلة والخلطة المرجعية، حيث يلاحظ ازدياد نسبة الفراغات المليئة بالإسفلت مع زيادة محتوى الإسفلت لجميع الخلائط وهذا ينسجم مع نقصان نسبة الفراغات الهوائية عند كل نسبة.



الشكل (٣-٣٢) العلاقة بين نسب نسبة الإسفلت والفراغات الهوائية في الخلائط الإسفلتية

تتفاوت نسبة الفراغات المليئة بالإسفلت بين كل خلطة وأخرى مع تغير نسبة الإسفلت كما هو مبين في الشكل (٣-٣٣)، و يلاحظ ازدياد نسبة الفراغات المليئة بنسبة /3.6%/ عن الخلطة المرجعية عند التعديل (25% RCA)، وازدادت بنسبة (6.2%) عن الخلطة المرجعية عند التعديل (50% RCA)، وعند التعديل بالخلطة (60% RCA) ازدادت الفراغات المليئة بنسبة (10.6%) مع بقاء نسب الفراغات المليئة ضمن الحدود المسموحة.



الشكل (٣-٣٣) العلاقة بين نسب نسبة الإسفلت والفراغات المليئة في الخلائط الإسفلتية

الاستنتاجات Conclusion

أجري هذا البحث بهدف دراسة إمكانية **استثمار مواد إعادة التدوير الإنشائية في المجبول الإسفلتي الخاص بطبقات التغطية الطرقية**، وإنتاج حصويات بديلة عن الحصويات الطبيعية في تصميم الخلطات الإسفلتية وبناءً على نتائج التجارب المخبرية الخاصة بتصميم الخلطات الإسفلتية التي أعدت ضمن هذا البحث، فإنه يمكن تلخيص النتائج التالية:

١- سجلت الحصويات المعاد تدويرها قيمة مرتفعة لعامل لوس أنجلوس (الفاقد بالاهتراء) حيث بلغت نسبة الزيادة /47%/ مقارنة مع الحصويات الطبيعية، إلا أنه يمكن تحسين عامل لوس أنجلوس للحصويات المعاد تدويرها عبر تعديلها بالحصويات الطبيعية.

٢- تعدُّ الحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA حصويات ذات مسامية وامتصاصية عالية مقارنة مع الحصويات الطبيعية وهذا يؤدي لانخفاض الوزن النوعي والكثافة للحصويات وبالتالي للمجبول الإسفلتي.

٣- تتمتع الحصويات المعاد تدويرها بقيمة مرتفعة للمكافئ الرملي وهذا يدل على نظافتها وخلوها من الشوائب، لأن الحصويات المستخدمة في صناعة البيتون الأصلي هي حصويات ذات نسبة مكافئ رملي عالية بحسب المواصفات الخاصة بالبناء.

٤- الإسفلت المستخدم في الدراسة هو إسفلت من الصنف /٦٠-٧٠/ والمستخدم في تصميم الخلائط الإسفلتية في سورية، وبينت نتائج الاختبارات أنه محقق للمواصفات الفنية المعمول بها.

٥- ازدادت نسبة الإسفلت المثالية في الخلائط التصميمة مع زيادة نسبة استخدام الحصويات المعاد تدويرها في الخلائط الإسفلتية، ويرجع السبب لزيادة خاصية امتصاص الحصويات المعاد تدويرها، مع بقاء جميع القيم ضمن حدود المواصفة المسموحة /4-6%/.

٦- انخفاض ثبات الخلائط الإسفلتية المصممة بنسب من الحصويات المعاد تدويرها عن ثبات الخلطة المرجعية، وخرجت قيمة ثبات الخلطة المصممة بنسبة استبدال /60%/ من الحصويات المعاد تدويرها عن حدود المواصفة.

٧- يزداد انسياب الخلائط الإسفلتية مع زيادة نسبة استبدال بالحصويات المعاد تدويرها ويعود ذلك لزيادة نسبة الإسفلت المستخدمة في كل خلطة.

٨- تنقص نسبة الفراغات الهوائية مع زيادة نسبة استخدام الحصويات المعاد تدويرها في الخلائط الإسفلتية، وبقيت جميع القيم ضمن حدود المواصفة المسموحة /5-3%/، وتزداد بالمقابل نسب الفراغات المليئة بالإسفلت مع زيادة نسب الاستبدال ويرجع ذلك للمسامية والامتصاصية المرتفعة لهذا النوع من الحصويات.

٩- حققت الخلائط الإسفلتية المصممة وفق طريقة مارشال تحسناً بخصائص المجبول مع تزايد نسبة الحصويات المعاد تدويرها حتى النسبة (50% RCA) ضمن الشروط والمواصفات المعمول بها في سورية، ثم انخفضت الخصائص الحجمية مع تزايد نسبة استخدام الحصويات المعاد تدويرها بعد هذه النسبة.

١٠-لا يمكن القول أن الهدف المبتغى من عملية استبدال الحصويات الطبيعية بالحصويات المعاد تدويرها في إنتاج خلائط إسفلتية ساخنة هو الفائدة الفنية أي تحسين خواص الخلائط الإسفلتية المنتجة، لكنه يبدو من المجدي جداً الاستفادة من الكميات الهائلة المنتجة سنوياً من نفايات وأنقاض الهدم والحد من تأثيراتها السلبية الكبيرة (بيئياً، اقتصادياً...) عبر إدخالها في إنتاج الخلائط الإسفلتية دون أن تؤثر سلباً على خصائص المجبول الإسفلتي المنتج.

التوصيات Recommendation

١- نوصي بإجراء المزيد من الاختبارات على الحصويات المعاد تدويرها، وفرز كل نوع من مواد الهدم الإنشائية، وتوصيفه، وتحديد نسب خلط هذه المواد مع بعضها لتحقيق أفضل المواصفات.

٢- البحث بإمكانية تحسين مواصفات الحصويات المعاد تدويرها عبر استخدام إضافة أحد أنواع البوليميرات أو المواد المثبتة.

٣- التحقق حقلياً من الخلائط المنتجة باستخدام الحصويات المعاد تدويرها، عبر تنفيذ مقاطع بأطوال مختلفة وسماكات مختلفة ودراسة الأداء الحقلي لهذه الخلائط.

٤- إجراء المزيد من الاختبارات المخبرية على الخلائط الإسفلتية مثل اختبارات التخدد، مقاومة التعب، مقاومة التشوهات، وعامل الصلابة.

المراجع العلمية:

1- Pasandín A.R., Pérez I. 2015. **Overview of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates**. Constr. Build. Mater. 2015;74:151–161. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.10.035

2- Andrzejuk W., Barnat-Hunek D., Siddique R., Zegardlo B., Lagod G.2018. **Application of recycled ceramic aggregates for the production of mineral-asphalt mixtures**. Materials. 2018;11:658. doi: 10.3390/ma11050658.

3- Janaína Motter, Leonardo Fagundes ،Rosemback Miranda ، Liedi Legi Bariani Bernucci, 2015. **Performance of Hot Mix Asphalt Concrete Produced with Coarse Recycled Concrete Aggregate**. USA. American Society of Civil Engineers

4- Taeyoung Yun; In Tai Kim; Nyoung Rak Choi. 2010. **The Application of Recycled Concrete Aggregate (RCA) for Hot Mix Asphalt (HMA) base Layer Aggregate**. Koria. Korian society of engineering

5- Abdelzaher Mostafa ، Mohamed Ouf ، Abdel latif Jamal. 2015. **Developing an Environmentally Sustainable Hot Mix Asphalt Using Recycled Concrete Aggregates**. Egypt. Journal of Engineering Research and Applications

6- Al- Sarrag Nabil; Al-Baiti Hanaa; Al-Maliky Suham 2014 **"Use of Recycling Building Demolition waste As Coarse Aggregate in Hot Mix Asphalt**. Iraq "College of Engineering -Tikrit University

7- EKTAS Serhat; KARACASU Murat. 2012. **Use of Recycled Concrete in Hot Mix Asphalt and an ANN model for Prediction of Resilient Modulus** ،turkey, Department of Civil Engineering

8- Alfaqawi Rami 2012**. Using recycled aggregate in hot asphalt mixtures in Gaza strip**. UK. Department of Civil Engineering, University of Nottingham

9- Hillar Jacob; Desphande Yogini; Qin Yingon. 2011**. Efficient use of recycled concrete in transportation infrastructure**. USA. Michigan technological university.

10- Arshad M., Ahmed M.F.2017. **Potential use of reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate in base/subbase layers of flexible pavements**. Constr. Build. Mater. 2017;151:83–97. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.028.

11- Cho Y.-H., Yun T., Kim I.T., Choi N.R.2011. **The application of Recycled Concrete Aggregate (RCA) for Hot Mix Asphalt (HMA) base layer aggregate**. KSCE J. Civ. Eng. 2011;15:473–478. doi: 10.1007/s12205-011-1155-3

12- Pasandín A.R., Pérez I. **Mechanical properties of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates coated with bitumen emulsion**. Constr. Build. Mater. 2014;55:350–358. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.053

13- Hou Y., Ji X., Su X., Zhang W., Liu L.2014. **Laboratory investigations of activated recycled concrete aggregate for asphalt treated base**. Constr. Build. Mater. 2014;65:535–542. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.115

14- Bhusal S., Li X., Wen H.2011. **Evaluation of effects of recycled concrete aggregate on volumetrics of HMA**. Transp. Res. Rec. 2011;2205:36–39.

15- Rafi M.M., Qadir A., Siddiqui S.H.2011. **Experimental testing of hot mix asphalt mixture made of recycled aggregates**. Waste Manag. Res. 2011;29:1316–1326. doi: 10.1177/0734242X10370379

16- Pérez I., Toledano M., Gallego J., Taibo J. Mech**anical properties of hot mix asphalt made with recycled aggregates from reclaimed construction and demolition debris**. Mater. De Constr. 2007;57:17–29.

17- Pérez I., Pasandín A.R., Medina L. **Hot mix asphalt using C&D waste as coarse aggregates**. Mater. Des. 2012;36:840–846

١٨- ميا، فاطر. **تدوير نواتج هدم الأبنية لاستخدامها في إنشاء الطرق المحلية في مدينة اللاذقية.** أطروحة ماجستير، كلية الهندسة المدنية، جامعة تشرين، ٢٠١٣

١٩- أصلان، باسل. **دراسة ملائمة استخدام أنقاض الهدم المحلية المدورة في صناعة بعض مواد البناء (اللبنات الإسمنتية المفرغة – بلاط الأرصفة العادي والمتداخل).** أطروحة ماجستير، كلية الهندسة المدنية، جامعة تشرين، ٢٠١٥