The Use Recycled Glass Waste in Geotechnical Road Courses

Ghonwa Zarba*

(Received 28 / 10 / 2019. Accepted 29 / 4 / 2020)

□ ABSTRACT □

The purpose of this research is to study the use of recycled glass in base courses- class3, in addition to environmental and economic benefits.

Recycled Glass - Crushed Rock Blends were done by using recycled glass at (10, 20, 30, 40, 50)%. The changes in the properties of blends are investigated by using an extensive suite of geotechnical engineering laboratory tests including basic classification tests along with modified compaction, California Bearing Ratio and Los Angeles abrasion tests.

The main outcome of this research is the possibility of using recycled glass (4.75 mm maximum particle size) glass in pavement base- class 3 at optimum content is until 30%, which obtained the physical and mechanical properties are good and within the limits of the international standards ASTM.

Keywords: Recycled Glass, pavement base, California Bearing Ratio, Modified proctor.

*Academic Assistant, Department Of Geotechnical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

استخدام نفايات الزجاج المعاد تدويرها في إنشاء طبقات الأساس الجيوتكنيكية للطرق

غنوة زربا*

(تاريخ الإيداع 28 / 10 / 2019. قُبِل للنشر في 29/ 4 / 2020)

□ ملخّص □

يهدف هذا البحث إلى دراسة إمكانية استخدام نفايات الزجاج المعاد تدويرها في إنشاء طبقات أساس الطرق بحيث تكون مطابقاً للمواصفات المطلوبة لطبقة الأساس الحصوي للطرق (تدرج- 3)، بالإضافة إلى الأهداف البيئية والاقتصادية المتمثلة في التخلص الآمن من هذه النفايات.

تم في هذه الدراسة توصيف المواد المستخدمة (بقايا مقالع- نفايات الزجاج المكسر)، ثم تمت إضافة الزجاج المكسر لبقايا الحجر المكسر وفق نسب %(10, 20, 30, 40, 50)، ودراسة التغيرات الحاصلة في خواص مزيج (بقايا مقالع- نفايات الزجاج المعاد تدويرها) عن طريق تحديد التركيب الحبي وإجراء اختبارات الكثافة الجافة العظمى وفق بروكتور المعدلة وتحديد قيمة الاهتراء وفق لوس أنجلوس، بالإضافة إلى إجراء اختبارات قدرة تحمل التربة CBR.

تشير نتائج هذه الدراسة إلى إمكانية استخدام نفايات الزجاج المعاد تدويرها وفق قطر أعظمي 4.75mm في رصف طبقات أساس الطرق(تدرج- 3) حتى النسبة 30% من الإضافة والتي تم الحصول عندها على خواص فيزيائية وميكانيكية جيدة وضمن حدود المواصفات السورية المسموحة.

الكلمات المفتاحية :الزجاج المعاد تدويره، طبقات أساس الطرق، قدرة تحمل التربة، بروكتورالمعدلة.

* قائم بالأعمال- قسم الهندسة الجيوتكنيكية -كلية الهندسة المدنية-جامعة تشرين- اللاذقية- سورية.

مقدمة:

ينتج عن الصناعات الحديثة المختلفة (البيتونية، البلاستيكية، الزجاجية ...)كميات كبيرة من النفايات الصلبة، ويشكل الزجاج ما نسبته 6% من مجمل النفايات الصلبة، حيث يتواجد على شكل نفايات ناتجة عن استخدام المنتجات الزجاجية بأنواعها المختلفة التي تشمل الأواني الزجاجية المنزلية والعبوات الزجاجية المختلفة....الخ، ويعتبر الزجاج من المواد التي لا تتحلل مع الزمن وغير قابلة للاحتراق وتشغل مساحات كبيرة، وبالتالي لا يمكن التخلص منها بسهولة، وتعتبر إعادة تدوير هذه النفايات الطريقة المُثلى للتخلص منها، وقد لاقت هذه العملية قبولا اجتماعياً واسعاً في المجتمعات الأوروبية[1,2,3].

يعود تاريخ صناعة الزجاج إلى نحو 3500 عام قبل الميلاد، حيث بدأت هذه الصناعة في بلاد ما بين النهرين وشمال سوريا والحضارة المصرية القديمة، وانتشرت في البلدان الأوروبية وأصبحت سلعةً ذات أهمية كبيرة عند نهاية القرن الرابع عشر وبداية القرن الخامس عشر الميلادي [4]، واتسعت تطبيقات الزجاج نتيجة التقدم التكنولوجي لتشمل صناعة السيارات ونوافذ المباني ومصابيح الإضاءة والأجهزة الإلكترونية المنزلية وألوح الطاقة الشمسية والألياف الزجاجية والاتصالات بالألياف الضوئية وغيرها...الخ [1].

يوفر كل 1طن من الزجاج المعاد تدويره حوالي 1 طن من المواد الأولية اللازمة لصناعة الزجاج وتشمل: 560 كغ من الرمل، 190 كغ من رماد الصودا (كربونات الصوديوم)، 176 كغ من مسحوق الحجر الكلسي، و 64 كغ من الفلسبار [5].

يلعب التركيب الكيميائي للزجاج دوراً كبيراً في تحديد إمكانية استخدم النفايات الزجاجية في صناعة منتجات زجاجية جديدة، حيث تتعرض بعض هذه النفايات للتلوث بالمواد الكيميائية والغذائية والأوساخ، بالإضافة إلى عدم إمكانية تدوير الزجاج المكسر مختلف الألوان (بسبب الاختلاف في التركيب الكيميائي) وزجاج المصابيح وزجاج الشاشات الإلكترونية المختلفة والزجاج المقاوم للحرارة، وبالتالي يتم ترحيل هذه النفايات إلى مكبات ومطامر خاصة وهذا ما يؤدي إلى زيادة مساحة مكبات النفايات بسبب الطبيعة الخاملة للزجاج، حيث تحتاج عبوة زجاجية واحدة إلى مليون عام لكي تتحلل، وهذه تعتبر فترة زمنية كبيرة يفضل خلالها استخدام المكبات للمواد القابلة للتحلل [6,7].

ركز الباحثين جهودهم خلال العقود السبعة الماضية حول دراسة إمكانية نفايات الزجاج المكسر Crushed Waste Glass (CWG) في قطاع البناء والإنشاء، حيث تمت دراسة إمكانية استخدام نفايات الزجاج المكسر في إنتاج القرميد والاسمنت وكبديل جزئي عن الحصويات المستخدمة في إنتاج المجبول البيتوني، وتلك المستخدمة في طبقات رصف الطرق (ما تحت الأساس، الأساس، التغطية السطحية)[8,9].وتشير الدراسات المرجعية إلى أن الطريقة المثلى لاستخدام النفايات الزجاجية في إنشاء طبقات الأساس وما تحت الأساس تتطلب تنظيفها من الملصقات الورقية والأغطية البلاستيكية وتكسيرها مباشرة دون وبشكل مستقل، ثم يتم مزجها مع الحصويات المكسرة واستخدامها في طبقات رصف الطرق [10,11].

أُجريت العديد من الدراسات التجريبية للتحقق من إمكانية استخدام نفايات الزجاج المكسر(CWG) في إنشاء طبقات أساس وما تحت أساس الطرق، واعتمدت تلك الدراسات على مجموعة من التجارب المخبرية التي تشمل: اختبارات لوس أنجلوس واختبارات قدرة التحمل(CBR)و تحديد الكثافة العظمى وفق طريقة بروكتور المعدلة، وتوصلت العديد من هذه الدراسات إلى إمكانية استخدام الزجاج المكسر بنسبة 30%في إنشاء طبقات

أساس الطرق[1,12]، هذا وتوصي وزارة النقل الأمريكية بإمكانية استخدام الزجاج المكسر ذي قطر أعظمي 9.5mm حتى نسبة 30% في رصف طبقات أساس الطرق شرط إجراء الفحص البصري للزجاج المستخدم والتأكد من نظافته من جميع الملصقات الصناعية[13].

درسAliوآخرون عام 2011 إمكانية استخدام مزيج (الصخور البازلتية + نفايات الزجاج المكسر) في رصف طبقات ما تحت أساس الطرق الاسترالية، حيث تم استخدام الصخور البازلتية المكسرة Crushed Rock (CR)بقطر أعظمي 20mm ونفايات الزجاج المكسرRecycled Glass (RG) بقطر أعظمي 5mm وفق نسب وزنية %(10, 15, 20, 30, 40, 50) من وزن الصخور البازلتية، وأشارت نتائج هذه الدراسة إلى توافق قيم الاهتراء وفق لوس أنجلوس وقيم قدرة التحمل وفق اختبار CBR مع المواصفات المحلية الاسترالية لجميع العينات المصممة، وتوصلت إلى نسبة استبدال مثلى قدرها 30% من وزن الصخور البازلتية [12,14].

درس Finkle وآخرون عام 2007 خصائص المقاومة والكثافة الجافة العظمى/الرطوبة لمزيج (الحصويات الطبيعية– الزجاج المكسر)، حيث تم استخدام الزجاج المكسر وفق تراكيب حبية مختلفة وبقطر أعظمي يتراوح بين mm(19–9.5)، وذلك عند ثلاثة نسب %(10, 20, 30)،وجرى دراسة تأثير هذه الإضافة على نوعين من الحصويات (حادة الزوايا–المستديرة)، وأشارت نتائج الدراسة إلى أن قوام وخصائص مقاومة مزيج (الحصويات حادة الزوايا–الزجاج المكسر) هو أفضل من مزيج (الحصويات المستديرة– الزجاج المكسر) وذلك عند جميع النسب المدروسة وجميع الأقطار، وأشارت نتائج تجارب بروكتور إلى عدم حدوث تغيرات هامة وفقاً لقطر الزجاج المستخدم، والأهم من ذلك هونسبة الاستبدال والتي تلعب الدور الحاسم وفقاً لهذه الدراسة، حيث ازدادت الرطوبة المثالية وانخفضت الكثافة الجافة العظمى مع زيادة نسبة الاستبدال[15].

درس Senadheera وآخرون عام 2007 خواص مرونة مزيج (تربة كاليشcaliche–الزجاج المكسر)، وهذا النوع من الترب ذي جودة هندسية منخفضة وغالباً ما يستخدم في رصف طبقات ما تحت أساس الطرق منخفضة الحركة المرورية، وأشارت نتائج الدراسة إلى فعالية الزجاج المكسر في تحسين خواص المرونة وتحسين مقاومة هذه الترب الضعيفة شرط عدم تعرضها لمستويات إجهاد عليا تؤدي لعجز المزيج وفشله[16].

في العام 2000 أوصت الجمعية الأمريكية للطرق السريعة والنقل AASHTO بإمكانية استخدام الزجاج المكسر ذي قطر أعظمي 4.75mm في طبقات أساس الطرق حتى نسبة 20% بشكل آمن وروتيني، وسمحت للمهندسين زيادة النسبة عن ذلك شرط التحقق من قيم قدرة تحمل التربة، لكنها شددت على أهمية مرور ما نسبته 99% من الزجاج المكسر من المنخل N0.200 لأجل اشتراطات السلامة المطلوبة [17].

قارن Phillip وآخرون عام 2008 بين قيم قدرة التحمل CBR للزجاج المكسر والحصويات البازلتية والمواد المعاد تدويرها من الرصف الإسفلتيو من الخرسانة البيتونية وذلك عند تراكيب حبية ثابتة وموحدة، وأشاروا إلى أن قيم قدرة التحمل للزجاج المكسر هي أعلى من مواد الرصف الإسفلتي المعاد تدويرها، لكنها أقل من قيم قدرة التحمل للحصويات البازلتية ومواد الخرسانة البيتونية المعاد تدويرها، وخلصت نتائج اختبارات القص إلى إمكانية استخدام الزجاج المكسر في تطبيقات أساس وما تحت أساس الطرق [18].

درس Torres وآخرون عام 2019 الخواص الميكانيكية لمزيج (التربة–اسمنت) المحتوية على نفايات الزجاج المعاد تدويرها بهدف استخدامها في رصف طبقات أساس الطرق، واعتمد الباحثون على الاستبدال الجزئي للمزيج بالزجاج المكسر وفق نسب استبدال %(5, 10, 15, 20, 30) وذلك عند نسب اسمنت ثابتة

%(0.1, 0.25, 0.5, 1, 3)، وأشارت نتائج هذه الدراسة إلى تحسن مقاومة القصوالضغط لجميع العينات المختبرة، وإلى أن نسبة الاستبدال المثلى هي 10% من نفايات الزجاج المكسر عند نسب اسمنت %(1-3)، والتي كانت عندها قيم قدرة التحمل عندها%(139-143)وقيم مقاومة الضغطMPa(4.90-6.62)[19].

ويناقش هذا البحث إمكانية استخدام نفايات الزجاج المكسر في إنشاء طبقات أساس الطرق وفقاً للمتطلبات والمواصفات المحلية، وتحديد النسبة المثلى لهذا الاستخدام.

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث لدراسة الخواص الميكانيكية لمزيج (بقايا مقالع(حصويات مكسرة)-زجاج معاد تدويره)، وتحديد النسب المثلى لاستخدام نفايات الزجاج في رصف طبقات أساس الطرق ذي تدرج-3، بالإضافة للأهداف البيئية والاقتصادية المتمثلة في التخلص من هذه النفايات.

طرائق البحث ومواده:

1-مواد البحث:

1- حصويات مكسرة (بقايا مقالع كلسية)ذي قطر أعظمي 19mm.

2- زجاج مكسر متعدد الألوان ذي قطر أعظمي 4.75 mm.

2-العمل المخبريLaboratory Job:

اعتمد في هذا البحث سلسلة من الاختبارات المحددة بالمواصفات التالية:

1- تجارب التحليل الحبي وفقا لمواصفة ASTM D.422-63.

2- تجربة بروكتور المعدلة وفق المواصفةAASHTO-T90-80.

3- تجربة الـــCBR وفق المواصفةAASHTO D1883.

4- تجربة الفاقد بالاهتراء Resistance Of Abrasionوفق المواصفاتASTM C.535-C131-06.

5- تجارب الوزن النوعي للحصويات Specific Gravityوفقا لمواصفات(ASTM (C.127- D.188.

3- منهجية البحث:

في البداية تم تحديد تنظيف عينات الزجاج المختلفة الألوان من الملصقات الورقية والأغطية المعدنية وتكسيرها يدوياً وفق تدرج حبي ذي قطر أعظميmm 4.75 (مار من المنخلN.04)،ومن ثم تم توصيفها وإضافتها لحصويات بقايا المقالع ذي قطر أعظمي 19mm وفق نسب %(10, 20, 30, 40, 50)، وجرى دراسة الخواص الفيزيائية والميكانيكية لمزيج (بقايا مقالع-زجاج معاد تدويره)، حيث تم اجراء تجارب الوزن النوعي وقدرة التحمل CBR وقيم الاهتراء وفق لوس أنجلوس وتحديد قيم الكثافة الجافة العظمى وفق بروكتور.

ومن ثم تمت مقارنة النتائج الحاصلة مع متطلبات طبقات الأساس الحصوي الواردة في المواصفات القياسية السورية والموضحة في الجدولين (1) و (2) [20] .

الجدول(1): المواصفات العامة لطبقة الأساس الحصوي

محتوى كبريتات الصوديوم (77 - T104 من AASHTO)	12 كحد أقصى
النقص بسبب الاهتراء (77 -T96 من AASHTO أو الاختبار رقم 11.1من هذه المواصفات).	45 كحد أقصى
المكافئ الرملي (73 -T176 من AASHTO أو الاختبار رقم 10.1 من هذه المواصفات).	45 كحد أدنى
حد السيولة (80 -T89 من AASHTO أو الاختبار رقم 6.1 من هذه المواصفات).	25 كحد أقصى
قرينة اللدونة (80 -T90 من AASHTO).	6 كحد أقصى
نسبة كاليفورنيا للتحمل (D1883 من AASHTO)، تدرج 1	100 كحد أدنى
نسبة كاليفورنيا للتحمل (D1883 من AASHTO)، تدرج 2	80 كحد أدنى
نسبة كاليفورنيا للتحمل (D1883 من AASHTO)، تدرج 3	65 كحد أدنى

الجدول(2): التدرجات الحبية لطبقة الأساس الحصوي

مقاس المنخل	النسبة المئوية للمار من المنخل		
	التدرج (1)	التدرج (2)	التدرج (3)
50 مم (2) إنش	100	-	-
37.5 مم (1.5) إنش	-	100	-
25 مم (1) إنش	85 - 55	95 - 70	100
19 مم (0.75) إنش	80 - 50	85 - 55	100 - 70
4.75 مم (رقم 4)	60 - 30	60 - 30	65 - 35
0.425 مم (رقم 40)	25 - 10	25 - 10	25 - 15
0.075 مم (رقم 200)	10 - 3	10 - 3	10 - 3
يجب أن لا يزيد الجزء المار من المنخل رقم 200 عن $\frac{1}{2}$ الجزء المار من المنخل 0.425 مم (رقم 40).			

النتائج والمناقشة:

1- تحديد خواص المواد الخام:

تم تحديد التدرج الحبي لعينات بقايا مقالع وعينات الزجاج المعاد تدويره، ويظهر الجدول (3) الخصائص الأساسية لهذه العينات وفقاً لاختبار التدرج الحبي.

الجدول(3): الخوص الأساسية للعينات المدروسة

	بقايا حجر مكسر	الزجاج المعاد تدويره
القطر الأعظمي للجزيئات (mm)	19	4.75
D10 (mm)	0.075	0.15
D30 (mm)	2.2	0.4
D60 (mm)	7	0.95
معامل التجانس (Cu)	93.3	6.3
معامل الانحناء (Cc)	9.2	1.1
نسبة المواد الخشنة %(>2.36 mm)	60	23.8
نسبة الرمل %(0.075-2.36 mm)	30	73.2

نسبة المواد المالئة %(< 0.075 mm)	10	3

تُشير القيم العالية لمعامل التجانس لعينات بقايا المقالع إلى اختلاف أكبر في حجم الحصويات، وبالتالي سوف تملأ الحصويات الأصغر حجماً هذه الفراغات وهذا ما يؤدي إلى زيادة الكثافة الجافة العظمى.

2- الخصائص الفيزيائية للعينات المدروسة:

تم تحديد قيم الوزن النوعي والفاقد بالاهتراء لعينات بقايا الحجر المكسر وعينات الزجاج المعاد تدويره الموضحة في الجدول (4)، وتشير النتائج إلى أن قيم الوزن النوعي للزجاج هي أقل من قيم الوزن النوعي المطلوب للحصويات الطبيعية (2.6-2.83) [21]، وهذا ما سوف يؤثر على قيم الكثافة الجافة العظمى، كما نلاحظ بأن قيم الفاقد بالاهتراء هي أعلى من نظيرتها في الحجر المكسر، ويعزى ذلك إلى الطبيعة الهشة لجزيئات الزجاج.

الجدول(4): الخصائص الفيزيائية للعينات المدروسة

	بقايا مقالع	الزجاج المعاد تدويره
الوزن النوعي	2.847	2.511
الفاقد بالاهتراء %	23	28

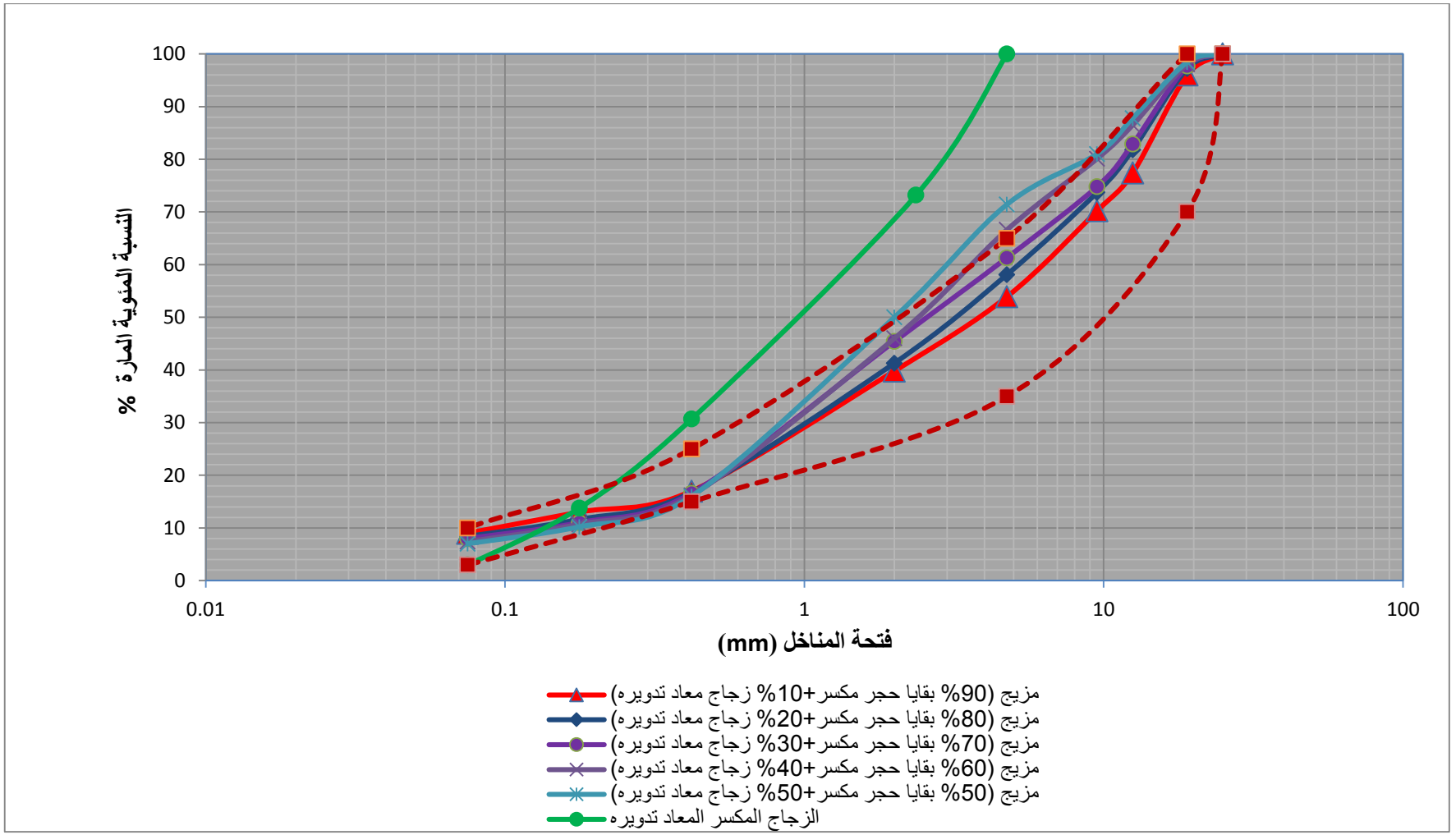
تم تحديد الخواص الميكانيكية لعينات بقايا الحجر المكسر وعينات الزجاج المعاد تدويره الموضحة في الجدول (5)، وتشير النتائج إلى أن قيم الكثافة الجافة العظمى للزجاج هي أقل من قيم الكثافة الجافة المطلوبة للحصويات الطبيعية gr/cm^3 (1.9-2) [22].

الجدول (5): الخصائص الميكانيكية للعينات المدروسة

	بقايا مقالع	الزجاج المعاد تدويره
الكثافة الجافة العظمى وفق بروكتور gr/cm^3	2.249	1.83
الرطوبة المثالية %	8.5	9.1

4-3- التدرج الحبي لمزيج (بقايا مقالع- الزجاج المعاد تدويره):

تم إضافة الزجاج المعاد تدويره لبقايا الحجر المكسر وفق نسب %(10, 20, 30, 40, 50)ويظهر الشكل (1) التدرج الحبي لمزيج بقايا الحجر المكسر-الزجاج المعاد تدويره وفق نسب الإضافة المختلفة. وتشير النتائج إلى أن منحنيات التدرج الحبي لمزيج (بقايا مقالع- الزجاج المعاد تدويره) هو ضمن حدود المواصفات السورية المطلوبة لإنشاء طبقات الأساس باستخدام حصويات من التدرج (3) حتى النسبة 30% من الزجاج المعاد تدويره، في حين أنها خرجت قليلاً عن حدود المواصفات عند النسبتين %(40, 50)، وهذا مؤشر لبعض الصعوبات التي قد تحدث خلال الأعمال الحقلية، وبالتالي الحاجة إلى تصحيح منحنيات التدرج باستخدام قطع زجاج معاد تدويره بأقطار حتى 10mm.

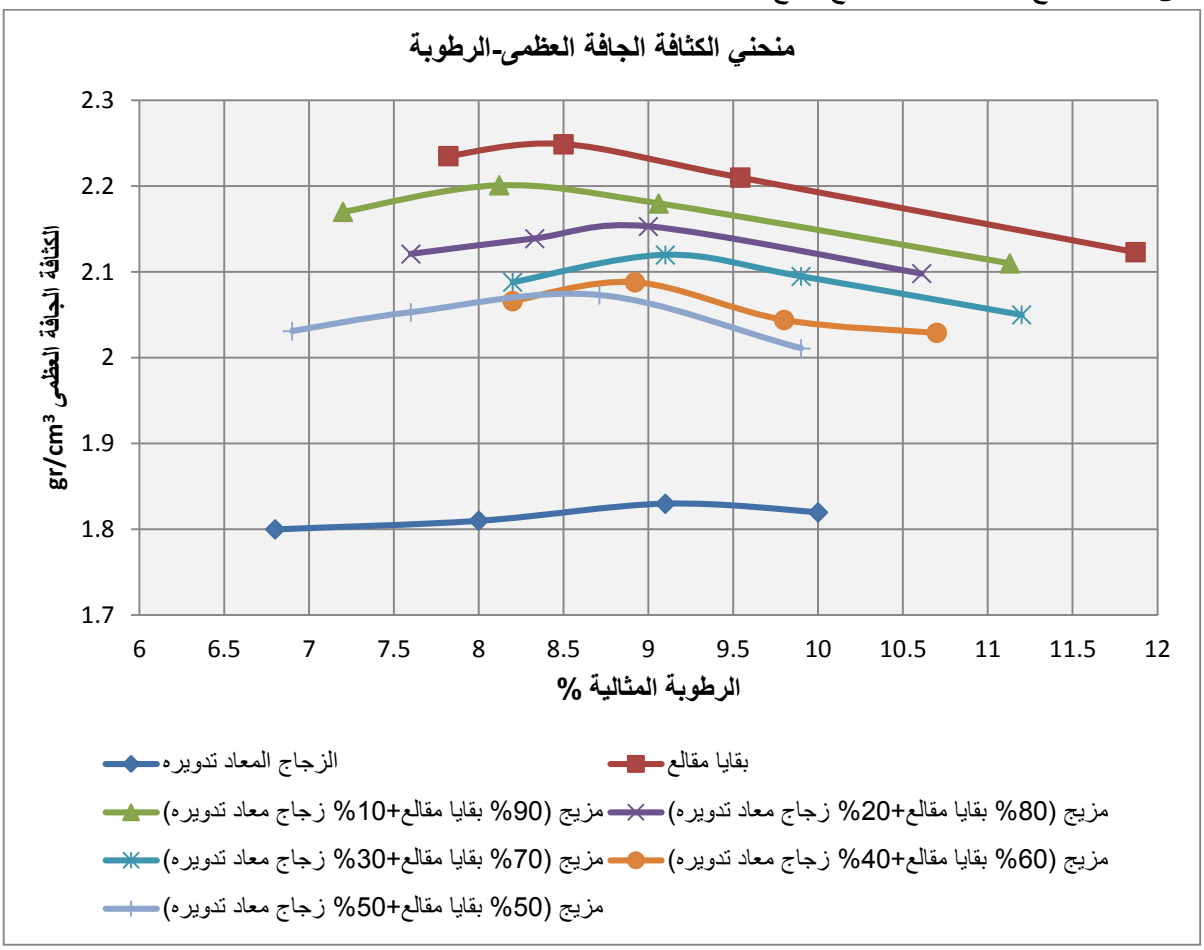


الشكل (1):التدرج الحبي لمزيج (بقايا مقالع–زجاج معاد تدويره)

Print ISSN: 2079-3081 , Online ISSN:2663-4279

4- الخصائص الميكانيكية لمزيج (بقايا مقالع- الزجاج المعاد تدويره):

تم تحديد قيم الكثافة العظمى وفق بروكتور المعدلة لمزيج (بقايا مقالع- الزجاج المعاد تدويره) كما هو موضح في الشكل(2) والجدول (6)، وتشير النتائج إلى أن عينات بقايا المقالع تمتلك الكثافة الجافة الأعلى (MMD=2.49 gr/cm^3)، في حين تمتلك عينات الزجاج الكثافة الأصغر(MMD=1.83 gr/cm^3)، وبالتالي نلاحظ تناقص قيم الكثافة الجافة مع زيادة نسبة الزجاج المعاد تدويره في الخلائط المدروسة مع بقائها أعلى من 2gr/cm^3 لجميع العينات المدروسة، ويعزى هذا التناقص إلى أن القطر الأعظمي المستخدم لجزيئات الزجاج 4.75mm وإلى انخفاض كثافة الزجاج بالمقارنة مع عينات بقايا المقالع التي تمتلك جزيئات أكبر وقيم كثافة أعلى وتتفق نتائج هذه الاختبارات مع نتائج الدراسات السابقة [13,15,23].



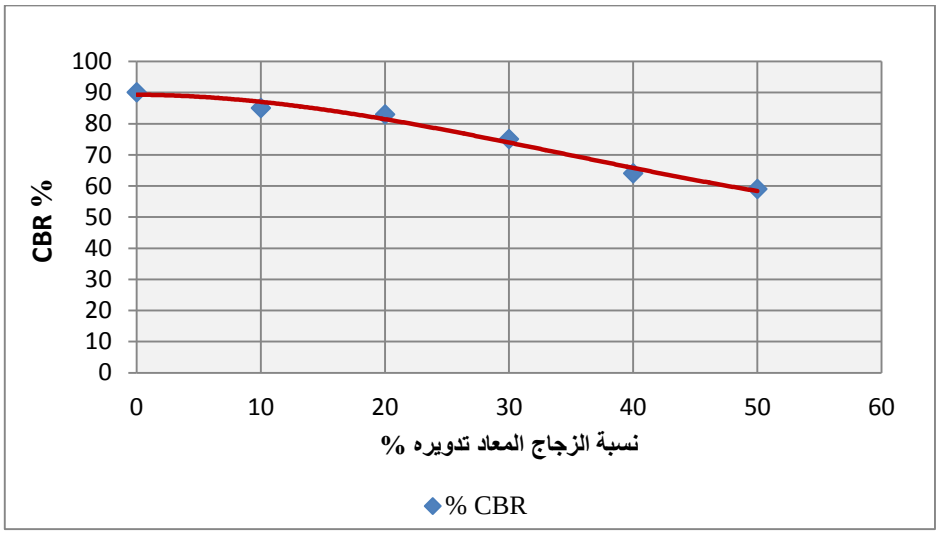
الشكل (2):منحني الكثافة الجافة العظمى-الرطوبة وفق بروكتور المعدلة (بقايا مقالع-زجاج معاد تدويره)

الجدول (6): الخصائص الميكانيكية لمزيج (بقايا مقالع-الزجاج المعاد تدويره)

نسبة الزجاج المعاد تدويره %	0	10	20	30	40	50
الكثافة الجافة العظمى gr/cm^3	2.249	2.201	2.153	2.12	2.088	2.073
الرطوبة المثالية %	8.5	8.12	9	9.1	8.92	8.71
الفاقد بالاهتراء %	23	23	23	23	24	24
قدرة التحمل	90	85	83	75	64	59

تشير نتائج قيم الفاقد بالاهتراء لمزيج (بقايا مقالع- الزجاج المعاد تدويره) إلى أنها مطابقة للمواصفات السورية المطلوبة لإنشاء طبقات الأساس لجميع العينات المدروسة (45>).

أظهرت اختبارات قيم قدرة التحمل CBR الموضحة في الشكل (3) تناقصاً ملحوظاً مع زيادة نسبة الزجاج المعاد تدويره مع بقائها ضمن حدود المواصفات المطلوبة حتى النسبة 30% من الإضافة، إلا أنها خرجت عن حدود المواصفات القياسية السورية المطلوبة لحصويات الأساس ذي التدرج(3) عند النسبتين %(40, 50) من إضافة الزجاج المعاد تدويره (65>)، وتتفق نتائج قيم قدرة التحمل التي حصلنا عليها مع نتائج الدراسات السابقة [13,15,23].



الشكل (3):قيم قدرة التحمل CBR لمزيج (بقايا مقالع-زجاج معاد تدويره)

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

1- يؤدي استخدام الزجاج المعاد تدويره في إنشاء طبقات أساس الطرق إلى تناقص قيم الكثافة الجافة العظمى وتناقص قيم قدرة التحمل وازدياد قيم الفاقد بالاهتراء مع زيادة نسبة الإضافة.

2- تناقص قيم الكثافة الجافة العظمى بمقدار %(2, 4, 5.7) عند النسب %(10, 20, 30) من نفايات الزجاج المكسر مع بقاء قيم الفاقد بالاهتراء وقيم قدرة التحمل ضمن حدود المواصفات المسموحة.

3- خروج قيم قدرة التحملCBR عن حدود المواصفات المطلوبة عند النسب %(40, 50) من نفايات الزجاج المكسر.

4- النسبة المقترحة لاستخدام نفايات الزجاج المكسر في إنشاء طبقات أساس الطرق ذي تدرج-(3) هي 30%.

التوصيات:

1. دراسة خواص مزيج (بقايا مقالع- الزجاج المعاد تدويره) وتعيين معاملات القص وفق اختبار الضغط ثلاثي المحاور.

2. متابعة الأبحاث حول استخدام نفايات الزجاج المكسر المعاد تدويره في إنشاء الطرق وفق تدرجات وتراكيب حبية مختلفة.

3. دراسة تأثير النسبة المقترحة من الإضافة على حدود أتربرغ للترب الناعمة.

4. البحث في ديمومة خلائط (بقايا مقالع–زجاج مكسر) وتأثير عامل الزمن والتغيرات المناخية عليها.

References:

1) Mohajerani, A; Vajna, J; Cheung, T. H. H; Kurmus, H; Arulrajah, A; Horpibulsuk, S. *Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review*. Construction and Building Materials, 156, 2017, 443–467.

2) Usón, A; Ferreira, G;Vásquez, D;Bribián, I;Sastresa, E. *Environmental-benefit analysis of two urban waste collection systems*. Science of the Total Environment,2013, 72–77.

3) Jamshidi, A; Kurumisawa, K; Nawa, T; Igarashi, T. *Performance of pavements incorporating waste glass: The current state of the art*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 64, 2016, 211–236.

4) History of Glass, *History of Glass*, viewed 29 June 2019<http://www.historyofglass.com/glass-history/, 2019.

5) Glass Packaging Institute, *Why Recycle Glass?* viewed 29 June 2019, <http://www.gpi.org/recycling/why-recycle-glass>, 2019.

6) Environmental Protection Agency. *Advancing Sustainable Materials Management: 2013 Fact Sheet. Available from*. Assessing Trends in Material Generation, Recycling and Disposal in the United States, 2015.

7) Rahim, N; Amat, R; Ibrahim, N; Salehuddin, S; Mohammed, S; Abdul Rahim, M. *Utilization of recycled glass waste as partial replacement of fine aggregate in concrete production*. Materials Science Forum Vol 803, 2015, 16-20.

8) Mohajerani, A; Tanriverdi, Y; Nguyen, B; Wong,K; Dissanayake, H; Johnson, L; Whitfield, D; Thomson, G; Alqattan, E; Rezaei, A. *Physico-mechanical properties of asphalt concrete incorporated with encapsulated cigarette butts*. Construction and Building Materials, 153, 2017, 69–80.

9) Ukwatta, A; Mohajerani, A; Eshtiaghi, N; Setunge, S. *Variation in physical and mechanical properties of fired-clay bricks incorporating ETP biosolids*. Journal of Cleaner Production , 119, 2016, 76–85.

10) Fulton, B; Hogan, F . *Useof recycled glass in pavement aggregate*. 23rd ARRB Conference – Research Partnering with Practitioners, Adelaide, Australia, 2008.

11) Arulrajah,A; Disfani, M; Horpibulsuk, S; Suksiripattanapong, C; Prongmanee, N. *Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications.* Constr. Build. Mater. 58, 2014, 245–257.

12) Ali, M; Arulrajah, A; Disfani, M; Piratheepan, J. *Suitability of using recycled glass – crushed rock blends for pavement sub base applications*. Geo-Frontiers Congress 2011 © ASCE 2011, 2011, 1325–1334.

13) Clean Washington Center (CWC). *Methods for sampling and testing recycled glass*, Seattle, USA, 1996.

14) Ali, M; Arulrajah, A; Disfani, M; Piratheepan, J. *Potential use of recycled crushed concrete-recycledcrushed glass blends in pavement subbase applications*. geocongress 2012, 3662–3671.

15) Finkle, I; Ksaibati, K; and Robinson, T. *Recycled glass utilization in highway construction*. Transportation Research Board Annual Meeting 2007Paper 07-0929, 2007.
16) Senadheera, S. P; Rana, A; Jayawickrama, P. W. *Characterization of granular materials containing glass cullet for use in embankments*. Transportation Research Board Annual Meeting 2007, Paper 07–3341, 2007.
17) AASHTO M 318-01. G*lass cullet use for soil aggregate base course.* American Association of State Highway and Transportation Officials, 2000.
18) Phillip, S. K. Ooi; Melanie M. W. Li; Michelle L. Q. Sagario; Yonghui Song. Shear Strength Characteristics of Recycled Glass, Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board 2059(2059), 2008, 52-62.
19) Torres, R; Varela, F. *Mechanical performance of cement-stabilised soil containing recycled glass as road base layer*. Road Materials and Pavement Design, 2019.
20) Transportation Ministry, *Standard Specifications for Roads and Bridges*. Damascus, Syria, 2002
21) Clean Washington Center (CWC). *A tool kit for the use of post-consumer glass as a construction aggregate*. Seattle, USA, 1998.
22) Craig, R.F. *Soil mechanics*. 6th ed, Spon Press, London, UK, 1997.
23) Younus Ali, M. *Geotechnical Characteristics of Recycled Glass in Road Pavement Applications*, Swinburne University of Technology, Doctor of Philosophy, 2012.