التقييم التجريبي لتأثير تدرج الركام الخشن على خواص الخرسانة النفاذة في ليبيا

إبراهيم الهادي خالد معمر محمد الغويل عبد المنعم مصطفى السوقي
Ibrahimkh361@gmail.com mohamadoamar8@gmail.com monem.8012.mm@gmail.com
قسم الهندسة الإنشائية – كلية التقنية الهندسية – مسلاته – ليبيا

المخلص:

الخرسانة النفاذة هي نوع خاص من الخرسانة مصممة لتحقيق خصائص تدفق المياه والتهوية بشكل أفضل مقارنة بالخرسانة التقليدية. تستخدم هذه الخرسانة بشكل واسع في مجالات متعددة، مثل إدارة مياه الأمطار وتخفيف آثار الفيضانات. في هذا البحث، تم إنتاج الخرسانة النفاذة بدون مواد ناعمة. احتوت العينات على ركام بتدرجات مختلفة تحمل علامات A, B, C, D, E مع معامل النعومة بلغ 3.21% وتم اختبارها من أجل قوة الضغط والكثافة ومعدل التسرب والمسامية. بيّنت النتائج أنه تم الحصول على أفضل خليط من الخرسانة النفاذة باستخدام التدرج الكلي للمجموعة E. لوحظ وجود علاقة جيدة بين التدرج الكلي وقوة الضغط والكثافة ومعدل التسرب والمسامية كما هو موضح في البحث. لقد كان متوسط قوة الضغط عند 28 يوماً لهذه الخرسانة النفاذة هو 12.01 Mpa، وكانت الكثافة التي تم الحصول عليها لتدرج المجموعة E 1912 kg/m^3 مع معدل تسرب 36474 mm/hr ومسامية بنسبة 18.43%. تبرز أهمية هذا البحث في كون ليبيا مطلة على البحر الأبيض المتوسط وهي من الدول المعرضة للفيضانات في بعض مناطقها.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة النفاذة، قوة الضغط، معدل التسرب.

Abstract:

Pervious concrete is a special type of concrete designed to achieve better water flow and ventilation properties compared to traditional concrete. This concrete is widely used in various fields, such as storm water management and flood mitigation. In this research, permeable concrete was produced without fine materials. The samples contained aggregates of different gradations marked A, B, C, D and E with a fineness modulus of 3.21% . They were tested for compressive strength, density, infiltration rate, and porosity. The results indicated that the best mix of permeable concrete was obtained using the aggregate gradation from group E. A good relationship was observed between the aggregate gradation and compressive strength, density, infiltration rate, and porosity, as shown in the research. The average compressive strength at 28 days for the pervious concrete was 12.01 Mpa, and the density obtained for the gradation of group E was 1912 kg/m^3, with an infiltration rate of 36474 mm/hr and a porosity of 18.43%. Libya, located on the Mediterranean Sea, is a country susceptible to flooding in certain areas, highlighting the importance of this research.

Keywords: Pervious concrete; compressive strength; infiltration rat.

1. المقدمة:

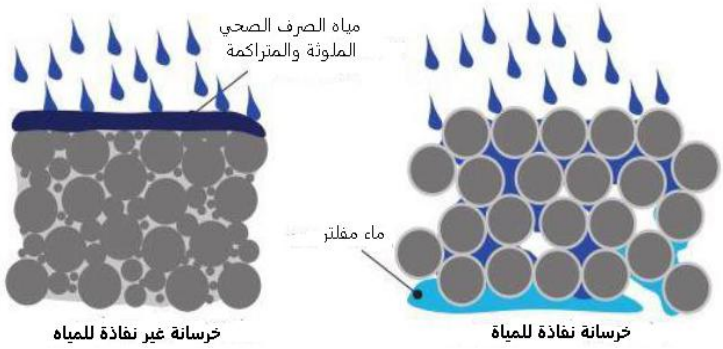
الخرسانة النفاذة هي نوع من الخرسانة مصممة لتكون قادرة على امتصاص وصرف المياه بشكل فعال. إن المواد المستخدمة في إنتاج الخرسانة النفاذة عبارة عن ركام خشن وإسمنت ومواد ناعمة قليلة أو معدومة في بعض الأحيان يتم استخدام مواد مضافة عالية الأداء تسمح بتسرب المياه من خلالها أثناء إعادة تغذية المياه الجوفية وتقليل الجريان السطحي في حالة حدوث عاصفة، خاصةً في المناطق الحضرية المعرضة للفيضانات بسبب زيادة هطول الأمطار وقلة النفاذية الناتجة عن الإنشاءات الضخمة باستخدام الخرسانة التقليدية غير النفاذة. وبشكل أساسي، تربط عجينة الإسمنت جزيئات الركام ببعضها البعض بعناية ولكنها تترك كمية كبيرة من الفراغات المترابطة مما يجعلها قابلة للاختراق. ومن هنا جاء اسم الخرسانة النفاذة بسبب طبيعتها القابلة لتسرب الماء من خلالها، وهي عبارة عن خرسانة قابلة لتسرب مياه الأمطار وتتحمل أيضًا أحمال المشاة وأحيانًا حركة المرور [1].يعتمد معدل التسرب للخرسانة النفاذة على المواد المستخدمة وعمليات الصب، وقد توصل الباحثون إلى معدل تسرب قدره 41910mm/hr [2]. كما يمكن وصفها بأنها خرسانة بدون مواد ناعمة وذلك للسماح للماء بالمرور من خلالها لتجنب التراكم وزيادة التحكم في الفيضانات [1]. ولقد تناولتها بعض الأبحاث الأخرى على أنها خرسانة تسمح بتصفية المياه من خلالها تدريجياً نتيجة لبنيتها المسامية [3]. إن الحاجة المتزايدة للاستدامة تجعل هذا النوع من الخرسانة وثيق الصلة بشكل أساسي بصناعة البناء [4].

يستخدم هذا النوع من الخرسانة في إنشاء ممرات السير والطرق المخصصة للمشاة ومواقف السيارات، مما يساعد في تقليل تجمع المياه عليها، أيضاً تستخدم في ممرات الحدائق لتسهيل تصريف المياه الزائدة ومنع تراكمها، كما تساهم هذه الخرسانة في تحسين إدارة المياه وتقليل تأثير الفيضانات، مما يجعلها خيارًا مثاليًا لبعض التطبيقات العمرانية. وقد أصبح استخدام الخرسانة النفاذة كبديل للخرسانة التقليدية شائعًا بشكل متزايد كوسيلة لاحتواء الجريان السطحي. وفي هذا الصدد، اقترح العديد من الباحثين محتويات مختلفة للفراغات في الخرسانة النفاذة. حيث اقترح Nicholas et al. نطاق محتوى الفراغات 10–30٪. بينما استخدم Amush مسامية في نطاق 15–35٪ ولكنهم خلصوا إلى أن 20–25٪ يعد الخيار المفضل [5]. المسامية التي تتراوح من 10 إلى 35٪ هي عامل رئيسي في تحديد قوة الضغط للخرسانة النفاذة، ويمكن إثبات العلاقة حيث أن زيادة المسامية ستؤدي في النهاية إلى انخفاض في قوة الضغط وسيحدث انخفاض آخر إذا كانت المواد الخام المستخدمة خفيفة الوزن [3].

إن السمة الفريدة لهذا النوع الخاص من الخرسانة هي مساميتها المترابطة والتي تتراوح عادةً من 15٪ إلى 30٪ مما يسمح للماء بالتدفق بمعدلات عالية [6]. ويؤدي عدم وجود المواد الناعمة إلى خلق بنية مسامية تسمح للماء بالتسرب من السطح إلى الأسفل عبر المسامات المترابطة، ونتيجة لوجود الفراغات في الخرسانة النفاذة، تتكون قنوات تدفق تعمل كمرشح للملوثات مثل الزيوت وغيرها، وتكون قوة الضغط للخرسانة النفاذة من 5.6 MPa إلى 21 MPa بعد 28 يومًا من المعالجة مقارنةً بالخرسانة التقليدية غير النفاذة والتي تكتسب قوة ضغط تصل

إلى 35 MPa بعد 28 يومًا من المعالجة [7]. وتحتوي خلطات الخرسانة النفاذة عادةً على تدرجات للركام الخشن والإسمنت والماء لإنتاج خرسانة تحتوي على 15% على الأقل من الفراغات [8].

ولقد تم إجراء أبحاث مكثفة على هذا النوع من الخرسانة (الخرسانة النفاذة) في أجزاء مختلفة من العالم وخاصة المناطق المعرضة للفيضانات. يُظهر Zhong تمييزًا واضحًا بين الخرسانة النفاذة للمياه والخرسانة غير النفاذة للمياه في الشكل (1) [9].



الشكل (1): الفرق بين الخرسانة النفاذة والخرسانة الغيرنفاذة

2. مشكلة البحث:

يمكن توضيح مشكلة البحث في النقاط الآتية:

1. هناك نقص حاد في الأبحاث المحلية، ومعظم الأبحاث العالمية حول الخرسانة النفاذة أجريت في بيئات ومناخات مختلفة (كمناطق آسيا وأمريكا الشمالية) باستخدام ركام قد يختلف في خصائصه الجيولوجية عن الركام الليبي. والاعتماد على نتائج أبحاث دولية دون التحقق من صحتها محليًا قد يؤدي إلى فشل التطبيقات أو عدم كفاءتها. هذا البحث يملأ هذه الفجوة ويوفر بيانات محلية.
2. توجد تحديات خاصة بنوعية الركام المحلي (المصدر الجيولوجي). الركام في ليبيا غالباً ما يكون من مصادر رسوبية (مثل الحجر الرملي) أو نارية (مثل الجرانيت). كل مصدر يعطي الركام خصائص مختلفة من حيث الشكل (دائري، زاوي)، المسامية والمقاومة والامتصاص المختلف عن المقاييس العالمية.
3. عدم تكييف المواصفات العالمية مع ظروف ليبيا المناخية وطبيعة المواد المحلية.

3. أهداف البحث:

يسعى البحث إلى تحقيق الأهداف الآتية:

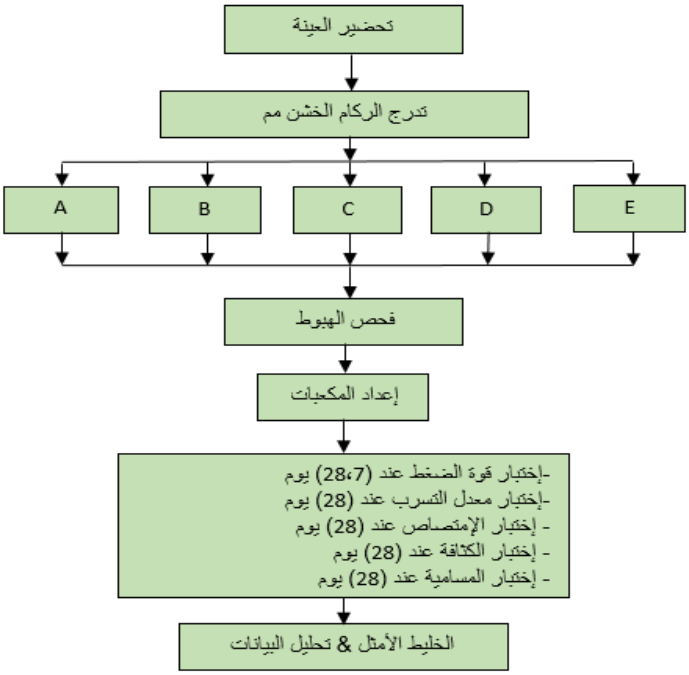
1. تقييم مدى ملائمة الركام المحلي لإنتاج خرسانة نفاذة متينة مع معدل تسرب عالي ومنخفضة التكاليف من خلال استخدام أحجام مختلفة من تدرج الركام الخشن للحصول على تدرج مثالي للخليط.

2. تحسين تصميم البنية التحتية لمقاومة الفياضانات في المناطق الحضرية. فالعديد من المدن الليبية تعاني من تشكل البرك والفياضانات المفاجئة أثناء هطول الأمطار الغزيرة بسبب عدم كفاءة شبكات الصرف الصحي وتطبيق هذه الخرسانة سيحول هذه الأسطح إلى مستوعبات (خزانات) مائية مؤقتة، تسمح بتسرب المياه إلى التربة مباشرة.
3. دراسة تأثير التدرجات المختلفة للركام الخشن على: معدل التسرب (Infiltration Rate)، مقاومة الضغط (Compressive Strength)، الكثافة والمسامية (Density & Porosity)، نسبة الإمتصاص (Absorption Rate).

إن هذا البحث سيُسهم في تطوير صناعة الخرسانة النفاذة المناسبة لليبيا، وتوفير حلول مستدامة لمشكلة إدارة مياه الأمطار، مع تحقيق وفرة في التكاليف باستخدام المواد المحلية.

4. البرنامج التجريبي:

تعتمد أهمية هذا البحث على المواد المتاحة لإنتاج الخرسانة النفاذة في ليبيا، والتي تشمل الإسمنت البورتلاندي العادي والركام الخشن والمياه النظيفة. ولتحقيق هذه الخلطات، سيتم اختبارها مع التدرجات المختلفة للركام الخشن، وأيضاً سيتم اختبار الخلطات الخرسانية المنتجة محليًا من الخرسانة النفاذة لقياس قوة الضغط لـ(7 و28 يومًا) ومعدل التسرب والامتصاص والكثافة والمسامية لـ28 يومًا. وتم تحليل البيانات للحصول على أفضل خليط للخرسانة النفاذة. ويتم التعبير عن ملخص البحث في البرنامج التجريبي كما هو موضح في الشكل (2).



الشكل (2): ملخص برنامج البحث التجريبي

5. المـــواد المستخدمة والبرنامج العملي:

1.5. المـــواد المستخدمة:

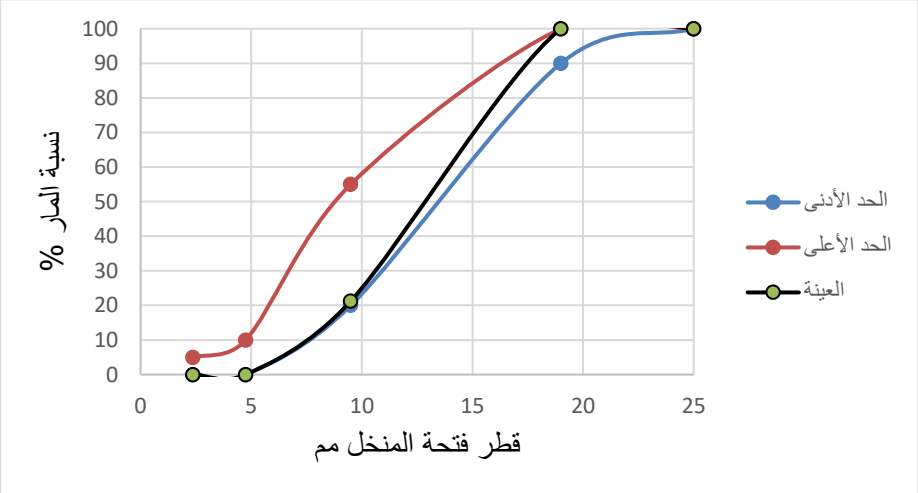
1.1.5. الركام الخشن:

تم الحصول على تدرجات الركام الخشن المستخدمة في هذا البحث من المحاجر الواقعة في الجزء الغربي من مدينة مســلاته في ليبيا، وتم تخزينه في بيئة بعيدة عن أشــعة الشــمس، وكذلك الأماكن الرطبة. وقد أجريت بعض الفحوصـات عليه للتأكد من مطابقته للمواصـفات القياسـية الليبية رقم (49) لسـنة (2002) (ركام الخرسـانة من المصـادر الطبيعية). المقاس الأقصـى للركام 19مم، والتدرج الحبيبي للركام الخشـن وفقاً للمواصـفة ASTM C33/C 33M-08، وكون الخرســانة النفاذة غير إنشــائية تم اختيار الركام ذو الحجم الواحد (Single Size Aggregate) للمجموعات A, B, C, D. أما الحجم الإسمي للركام الخشن فهو موضح بالجدول رقم (1).

الجدول (1): الحجم الإسمي للركام الخشن للمجموعات A, B, C, D

المجموعة	الحجم الإسمي للركام الخشن (مم)
A	16
B	14
C	12.5
D	9.5

وقد تم أخذ التدرج الحبيبي للركام الخشــن للمجموعة E وفقاً للمواصــفة ASTM C33/C 33M-08 ومنحنى التدرج الحبيبي وحدود المواصفة موضحة في الشكل (3).



الشكل (3): منحنى التدرج الحبيبي للركام الخشن

وتم إجراء مجموعة من الإختبارات على عينات فردية دفعة واحدة في نفس اليوم وتحت نفس الظروف، مما أدى إلى وجود تشـــابه فيما يتعلق بمحتوى الماء، كما تم النظر في الأحجام ونســـبة الامتصـــاص ومحتوى الرطوبة والوزن النوعي.

2.1.5. الإسمنت:

لقد تم الحصـــول على مادة الإســمنت البورتلاندي العادي المنتج من مصــنع لبدة التابع للشــركة الأهلية للإسمنت المساهمة مطابقاً للمواصفة القياسية الليبية رقـــم (1997/340). وتم تخزينه والحفاظ عليه في أماكن خاليه من الرطوبة.

2.5. تصميم الخلطات الخرسانية:

تعتمد الخرسانة النفاذة على مبدأ إنشاء هيكل حبيبي مفتوح المسامات من الركام الخشن يتم ربطه بطبقة رقيقة من عجينة الأسمنت فقط عند نقاط التماس بين الحبيبات دون أن يملأ الفراغات بينها، ويُشكّل الهيكل شبكة من الفراغات المترابطة (عادة 15%–25%) تكون مســؤولة عن مرور المياه والتي تتحكم فيها نســبة الركام إلى المادة الرابطة (الأسمنت والماء) ودرجة الرص. واستناداً إلى المعايير الأكاديمية والمواصفات بشكل رئيسي على وثائق ACI 522 واختبارات ASTM ذات الصلة للخرسانة النفاذة، وهي الأكثر شمولاً وتعتبر المرجع الرئيسي عالميًّا وتغطي التصميم، المواد، الخلط، الصب، الضبط، الاختبارات، والصيانة.

إن الطريقة التي اســتخدمت في التصــميم تســمى بطريقة الحجم المطلق وهي الأكثر دقة لأنها تأخذ في الاعتبار الكثافة النوعية للمواد، والهدف منها هو حســاب الحجم الذي يشــغله كل مكون (أســمنت، ركام، ماء، فراغات) بحيث يكون المجموع النهائي $1m^3$ من الخرسانة المتصلدة. وقد تم إجراء تجارب متعددة لكل المجموعات لتحديد الخلطة المثلى وللحصــول على تصــميم خلطة خرســانية فعالة. إن الهدف الرئيســي من البحث هو مدى ملائمة تدرج الركام الخشــن وإنتاج خرســانة نفاذة لتحقيق التوازن المطلوب بين المتانة الوظيفية (معدل التســرب) والمتانة الإنشائية (المقاومة) بالمواد المتوفرة محليًّا في ليبيا. تدرج المجموعة (E) متوازن وممتلىء يعني أن الخليط يحتوي على مجموعة متناغمة من الأحجام المختلفة. الحبيبات متوسـطة الحجم والصـغيرة (مثل 4.75 ملم) قامت بملء الفراغات الموجودة بين الحبيبات الكبيرة (مثل 19 ملم). هذه الظاهرة تســمى التعبئة الكثيفة حيث أصـــبح الهيكل الحبيبي للركام أكثر تراصاً ومتانة وزيادة مساحة التماسك مع عجينة الأسمنت وأكبر مقارنة بخليط يحتوي على تدرجات أكبر أي كلما زادت المساحة السطحية، زادت نقاط التماسك بين عجينة الأسمنت والركام وهذا يؤدي إلى تشكيل هيكل داخلي قوي يمكنه تحمل أحمال الضغط العالية بشكل أفضل. تم استخدام خليط الخرسانة C20 كمعيار مرجعي لتحليل خلطات الخرسانة الغير مسلحة كانت نسبة الركام إلى الإسمنت في عنصر التحكم 1:3 للخليط الخرســاني. والجداول (2، 3، 4، 5، 6) توضــح نســب مختلفة من المواد المســتخدمة (إســمنت، ركام)

للخلطات الخرسانية للحصول على نسبة تصميم الخلطة المثلى للخرسانة النفاذة بما في ذلك معدل التسرب وقوة الضغط.

وقد كانت كميات الماء المستخدم محسوبة بدقة لتحقيق التماسك المطلوب دون أن يؤدي إلى انفصال مكونات الخلطة أو جعلها سائلة. وأخذت نسبة الماء إلى الإسمنت المستخدم في الخليط الخرساني على أنها 0.3 وهي نسبة ثابتة في كل الإختبارات التجريبية المستندة إلى بعض الأبحاث السابقة، المعادلة (1) توضح الماء المطلوب (الماء الحر) أثناء الخلط لترطيب الإسمنت.

$$Free\ water = Amount\ of\ binder \times Water\ binder\ ratio \qquad (1)$$

إجمالي كمية الماء وهو إضافة الماء الذي يمتصه الركام الخشن والماء الحر بواسطة الإسمنت ولحساب الماء الكلي اللازم للخلط تم النظر في معدل الامتصاص للركام الخشن الجاف من خلال المعادلة (2).

$$Total\ water = Water\ absorpation\ for\ aggregate + Free\ wat$$

الجدول (2): نسب تصميم الخلطات للركام الخشن للمجموعة (A)

المواد المستخدمة	تصميم الخلطات		
	الخلطة 1	الخلطة 2	الخلطة 3
الإسمنت (kg/m^3)	400	430	450
الركام الخشن (kg/m^3)	1500	1450	1420
الماء (kg/m^3)	126	135	141
نسبة الركام الخشن للإسمنت	3.75	3.37	3.15
نسبة الماء للإسمنت	0.3	0.3	0.3

الجدول (3): نسب تصميم الخلطات للركام الخشن للمجموعة (B)

المواد المستخدمة	تصميم الخلطات		
	الخلطة 1	الخلطة 2	الخلطة 3
الإسمنت (kg/m^3)	400	430	450
الركام الخشن (kg/m^3)	1500	1450	1420
الماء (kg/m^3)	128	137	143
نسبة الركام الخشن للإسمنت	3.75	3.37	3.15
نسبة الماء للإسمنت	0.3	0.3	0.3

الجدول (4): نسب تصميم الخلطات للركام الخشن للمجموعة (C)

المواد المستخدمة	تصميم الخلطات		
	الخلطة 1	الخلطة 2	الخلطة 3
الإسمنت (kg/m^3)	400	430	450
الركام الخشن (kg/m^3)	1500	1450	1420
الماء (kg/m^3)	129	137	144
نسبة الركام الخشن للإسمنت	3.75	3.37	3.15
نسبة الماء للإسمنت	0.3	0.3	0.3

الجدول (5): نسب تصميم الخلطات للركام الخشن للمجموعة (D)

المواد المستخدمة	تصميم الخلطات		
	الخلطة 1	الخلطة 2	الخلطة 3
الإسمنت (kg/m^3)	400	430	450
الركام الخشن (kg/m^3)	1500	1450	1420
الماء (kg/m^3)	131	139	145
نسبة الركام الخشن للإسمنت	3.75	3.37	3.15
نسبة الماء للإسمنت	0.3	0.3	0.3

جدول (6): نسب تصميم الخلطات للركام الخشن للمجموعة (E)

المواد المستخدمة	تصميم الخلطات		
	الخلطة 1	الخلطة 2	الخلطة 3
الإسمنت (kg/m^3)	400	430	450
الركام الخشن (kg/m^3)	1500	1450	1420
الماء (kg/m^3)	132	141	146
نسبة الركام الخشن للإسمنت	3.75	3.37	3.15
نسبة الماء للإسمنت	0.3	0.3	0.3

1.2.5. اختبار قوة الضغط:

يتم إجراء اختبار قوة الضغط للخرسانة النفاذة وفقاً للمواصفة القياسية الأمريكية ACI 522.1-13، باستخدام مكعبات قياسية بأبعاد 150 × 150 × 150مم. وتشمل منهجية الاختبار الخطوات التالية:

أ- **تحضير القوالب:** يتم تنظيف وتزييت القوالب مسبقاً لمنع التصاق الخرسانة.

ب- **صب العينات:** تُملأ القوالب بالخرسانة على ثلاث طبقات متتالية، مع تسوية السطح باستخدام سكين معياري لضمان عدم وجود فراغات كبيرة.

ج- **المعالجة الأولية:** تُترك العينات عند درجة حرارة الغرفة لمدة 48 ساعة قبل نزع القوالب تدريجيًّا لتجنب تكسير الحواف والتشقق.

د- **المعالجة بالماء:** تُنقل العينات بعد إزالة القوالب إلى خزان مائي للعلاج حتى عمر الاختبار (7 و28 يوماً).

هـ- **إجراء الاختبار:** قبل الاختبار، تُجفف العينات سطحيًّا بقطعة قماش جافة، وتركها لتجف لمدة 60 دقيقة يتم وزن المكعب أولاً ويوضع في جهاز الضغط الإلكتروني، بطريقة تسمح للوصول لأقصى قوة ضغط حتى الكسر، مع تسجيل أقصى حمل مقاوَم.

و- **التكرار:** يتم اختبار مكعبين على الأقل لكل عينة وعمر زمني لضمان دقة النتائج.

يُحسب متوسط مقاومة الضغط بناءً على حمل الانهيار المسجل، مما يُمكّن من تقييم الأداء الإنشائي للخرسانة النفاذة عند كل من عمر 7 و28 يوماً.

2.2.5. اختبار امتصاص الماء للمكعبات الخرسانية:

يتم وضع عينات المكعبات الخرسانية 150مم × 150مم × 150مم في الفرن عند 105–110 درجة مئوية لمدة لا تقل عن 24 ساعة، وبعد التجفيف يتم أخذ وزن العينات الجافة (Wo). وبعد ذلك يتم غمر العينات في الماء لمدة 48 ساعة ثم إزالتها ووزنها بعد 30 دقيقة ويتم تسجيل الوزن المشبع (Wa). ويتم إجراء الإختبار لكل خلطة خرسانية طبقًا للمواصفة ASTM C642 ويتم حساب امتصاص الماء باستخدام المعادلة (3).

$$Water\ Absorption\ for\ Cubes\ \% = \frac{(Wa - Wo)}{Wo} \times 100 \qquad (3)$$

3.2.5. اختبار معدل التسرب:

لقياس معدل التسرب للخلطة الخرسانية تم تحضير قالب مقاس 600مم × 600مم × 150مم. تم تزييت القوالب لإزالتها وفكها بسهولة. وعند تحضير القوالب، يتم وضع الخرسانة بالداخل على ثلاث مراحل وفي كل

مرحلة يتم تعديل الجوانب الخارجية للقالب الخرساني بواسطة المجرفة لتجنب وجود فجوات كبيرة ثم تركها في درجة حرارة الغرفة. وبعد 24 ساعة يتم وضعها في خزان المياه لمدة 28 يومًا حتى يتم علاجها وإزالتها من القوالب كما في الشكل (4). ويتم تثبيت الحلقة لإجراء اختبار معدل التسرب لكل خلطة خرسانية طبقًا للمواصفة ASTM 1701C وهي طريقة الاختبار القياسية لقياس معدل التسرب للخرسانة النفاذة. تم اختبار معدل التسرب للخرسانة بعد 28 يومًا. ويتم حسابه باستخدام المعادلة (4). ويرمز لمعدل التسرب بالرمز (I)، والمعامل الثابت بالرمز (K)، وكتلة الماء بالرمز (M)، والقطر الداخلي لحلقة التسرب بالرمز (D)، والوقت اللازم لقياس كمية الماء المتسرب من الخرسانة بالرمز (T).

$$I = \frac{K * M}{(D)^2 * T} \qquad (4)$$

الشكل (4): إزالة العينات من القوالب ووضع حلقة التسرب

3.5. نتائج الاختبارات:

تقدم هذه الفقرة نتائج تحليل جميع الاختبارات التي تم إجراؤها على المواد المستخدمة وعينات الخرسانة مع جميع الخلطات التي تم الحصول عليها والتي تتضمن محتوى الخلطات للخرسانة النفاذة.

1.3.5. اختبار امتصاص الماء والوزن النوعي للركام الخشن:

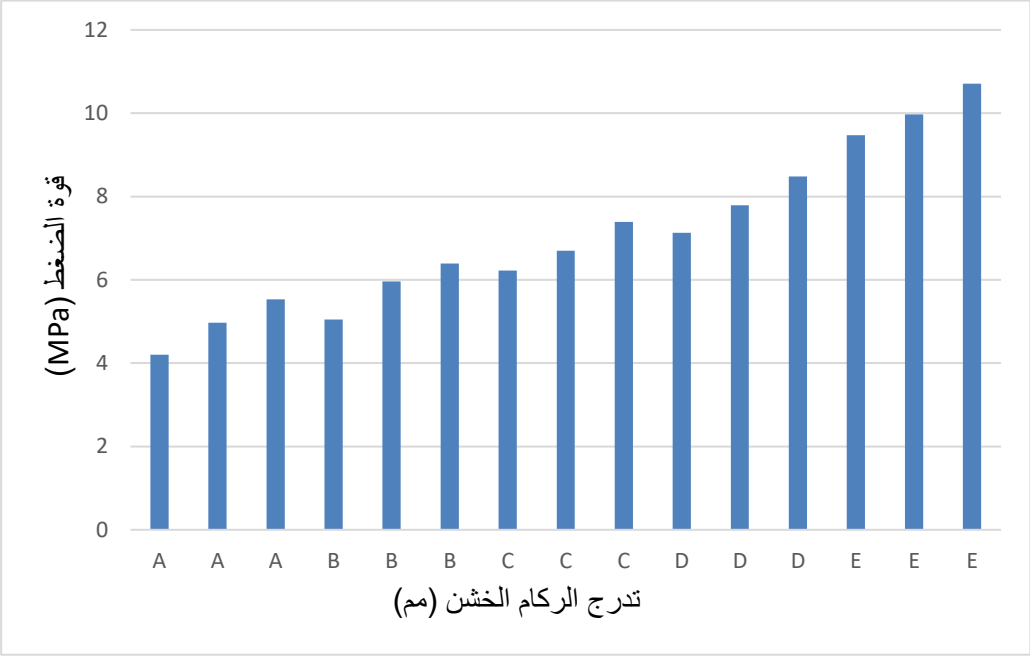
تم حساب امتصاص الماء للركام الخشن والوزن النوعي لكل مجموعة من المجاميع وفقًا للمواصفة ASTM C127 وهي طريقة الاختبار القياسية المستخدمة في قياس امتصاص الماء والوزن النوعي للحصول على إجمالي الماء اللازم لكل تصميم خلطة خرسانية. والخصائص الفيزيائية للركام المستخدم وحدود المواصفة موضحة بالجدول (7).

الجدول (7): الخصائص الفيزيائية للركام الخشن لكل المجموعات

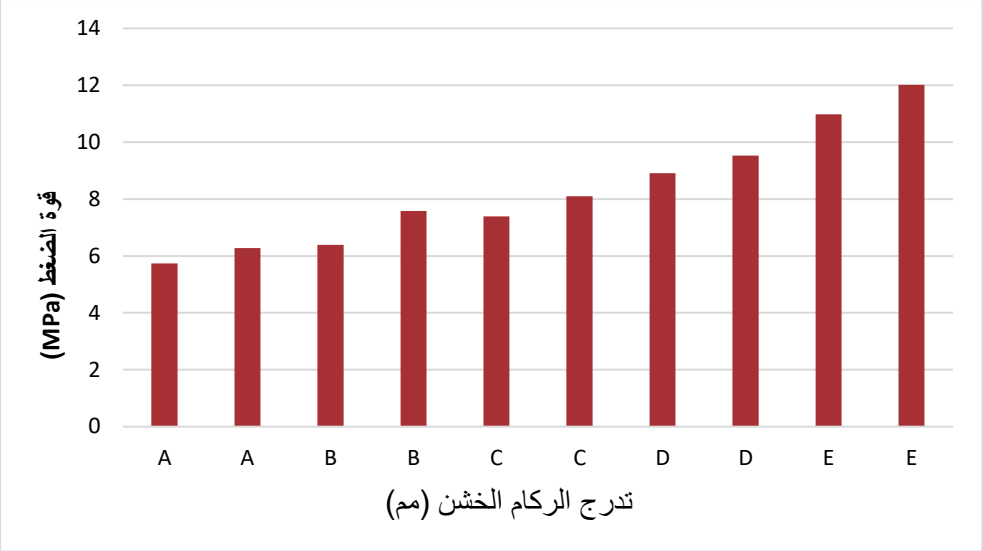
المجموعات	الإختبار				
	المواصفة	القيمة		حدود المواصفة	
		الوزن النوعي	الامتصاص (%)	الوزن النوعي	الامتصاص (%)
A	ASTM C127	2.62	0.40	2.7 – 2.5	3 >
B		2.65	0.52		
C		2.67	0.60		
D		2.70	0.70		
E		2.78	0.80		

2.3.5. تأثير تدرج الركام الخشن على مقاومة الضغط للخرسانة:

قوة الضغط للعينات التجريبية للخرسانة النفاذة عند 7 أيام موضحة في الشكل (5)، وقوة الضغط عند 28 يوم للخرسانة النفاذة موضحة في الشكل (6).



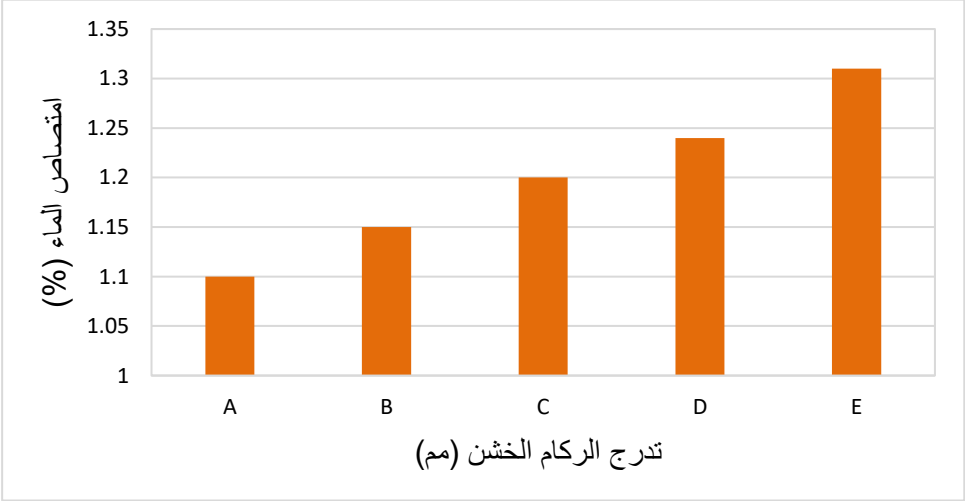
الشكل (5): قوة الضغط عند 7 أيام لكل الخلطات الخرسانية (A,B,C,D,E)



الشكل (6): قوة الضغط عند 28 يوم لكل الخلطات الخرسانية (A,B,C,D,E)

3.3.5. تأثير تدرج الركام الخشن على الامتصاص للخلطات الخرسانية:

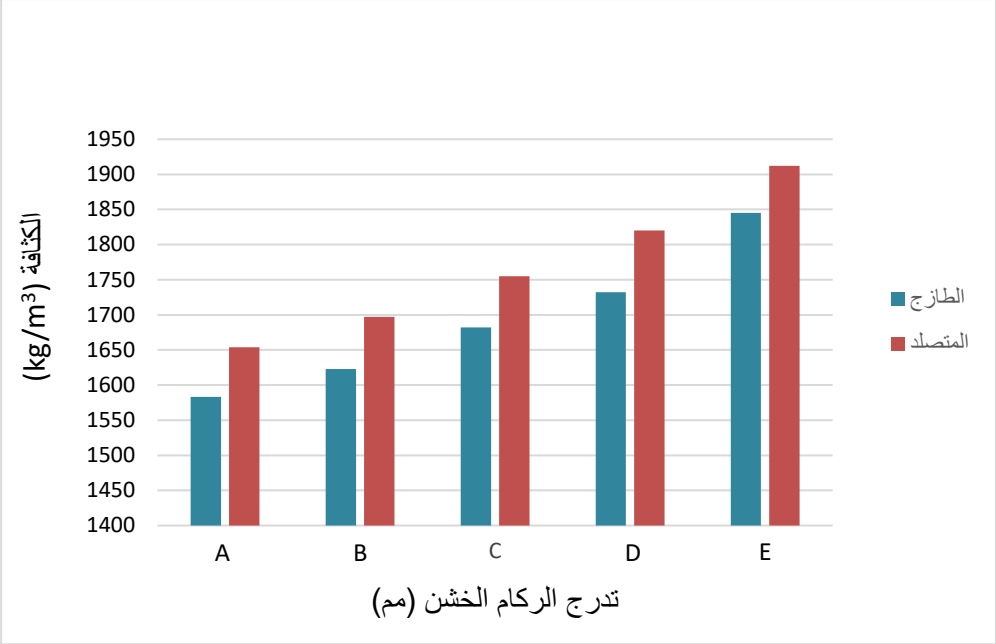
يظهر تأثير التدرج الخشن للركام على امتصاص الخلطات الخرسانية في الشكل رقم (7) لكل مجموعة.



الشكل (7): نسبة امتصاص الماء لكل خلطات الخرسانة

4.3.5. تأثير تدرج الركام الخشن على كثافة خلطات الخرسانة:

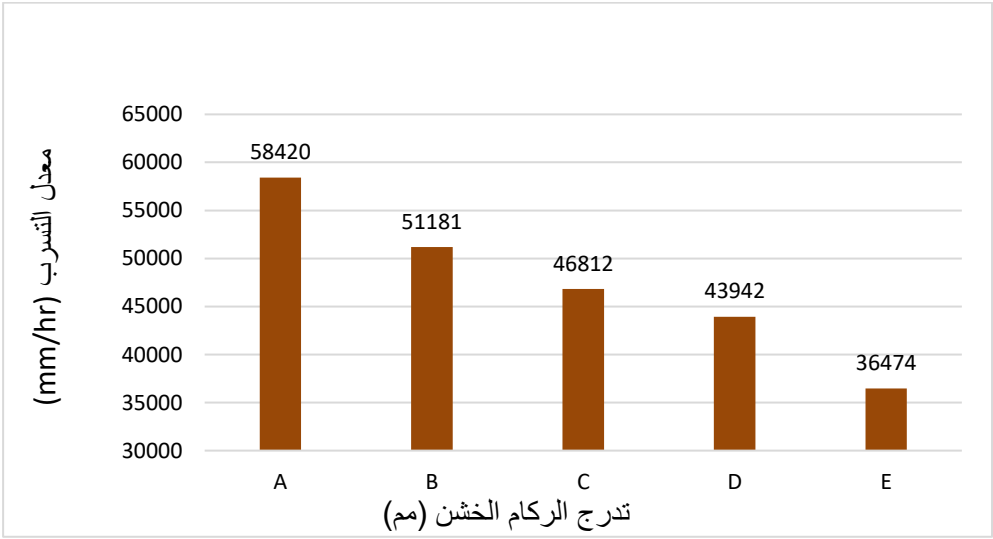
تقل كثافة الخرسانة مع زيادة نسبة الفراغ بسبب زيادة حجم الركام الخشن. وتظهر كثافة الخلطات الخرسانية في الحالة الطازجة والمتصلدة في الشكل (8).



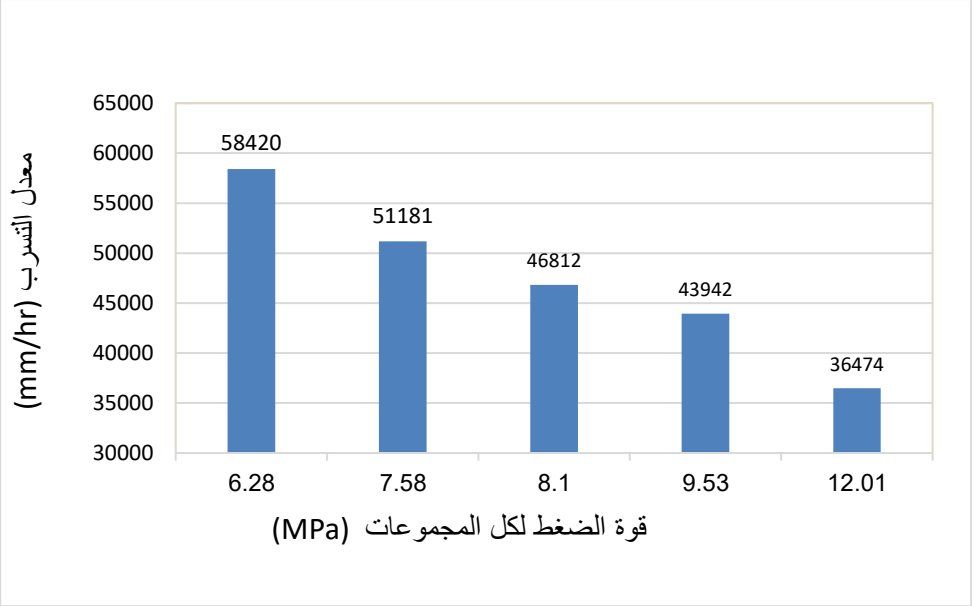
الشكل (8): كثافة الخرسانة (الطازجة والمتصلدة)

5.3.5. نتائج اختبار معدل التسرب:

نتائج اختبارات معدل التسرب للخلطات الخرسانية في البرنامج التجريبي تبين إظهار تأثير تدرج الركام الخشن على معدل التسرب. ولوحظ أن قيمة معدل التسرب يزداد مع زيادة حجم الركام المستخدم في الخلطات الخرسانية كما موضحة في الشكل (9). والشكل (10) يوضح منحنى العلاقة بين قوة الضغط لمدة 28 يوم ومعدل التسرب لكل المجاميع.



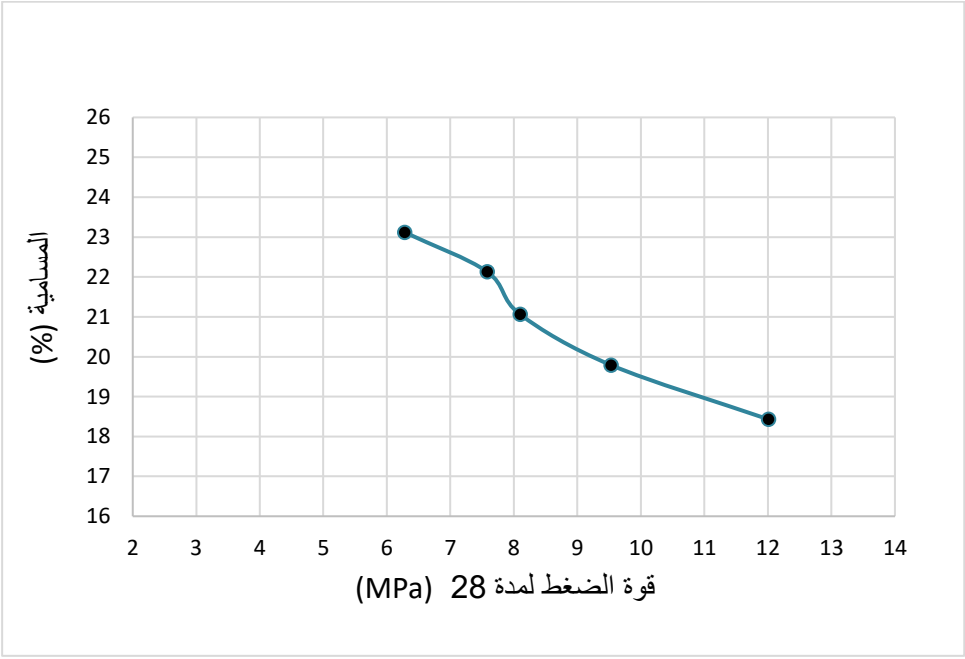
الشكل (9): العلاقة بين معدل التسرب وتدرج الركام الخشن



الشكل (10): منحنى العلاقة بين قوة الضغط لمدة 28 يوم ومعدل التسرب لكل المجاميع

6.3.5. تأثير المسامية على قوة الضغط عند 28 يوم ومعدل التسرب:

يمكن مشاهدة تأثير مسامية الخلطات الخرسانية على قوة الضغط عند 28 يوم في الشكل (11). ومن الواضح أن قوة الضغط للخرسانة المتصلدة تتناقص مع زيادة المسامية بسبب زيادة حجم الركام.



الشكل (11): العلاقة بين قوة الضغط عند 28 يوم والمسامية

6. مناقشة النتائج والاستنتاجات:

في هذا البحث تم استخدام أحجام مختلفة من تدرج الركام الخشن للحصول على تدرج مثالي للخلطة. أظهرت نتائج المكعبات الخرسانية أن زيادة حجم الركام أدى إلى انخفاض في قوة الضغط نتيجة لزيادة نسبة الفراغات في الخرسانة النفاذة وتم اختبار قوة الضغط عند 7 أيام لجميع الخلطات ولوحظ ان المجموعة (E) (4.75–19)مم مثلت نقطة توازن ممتازة بين القوة ومعدل التسرب وصلت قوة الضغط 10.71 MPa وهي الأعلى بين المجاميع، وكان متوسط قوة الضغط عند 28 يومًا للمجموعة (E) 12.01 MPa وهي الأعلى مقارنة بأحجام التدرجات الأخرى بسبب وجود أحجام ركام أصغر في الخليط ولكن هذا أثر على معدل التسرب الذي لوحظ أنه 36474 mm/hr نتيجة لانخفاض نسبة الفراغات في الخرسانة. كانت نسب الامتصاص للخرسانة النفاذة 1.31% وهي منخفضة جداً مقارنة بالخرسانة العادية التي تصل فيها نسبة الامتصاص من 0% إلى 5% بسبب زيادة محتوى الأسمنت في الخليط، فعجينة الاسمنت تزيد من التلاصق بين حبيبات الركام، إضافة إلى أنه سيملأ بعض الفراغات الموجودة مما يقلل من حجم الفجوات الموجودة في الكتلة الخرسانية؛ وبالتالي تقل نسبة الامتصاص، لوحظ أيضاً أن الكثافة هي الأعلى بين مختلف المجاميع حيث بلغت 1912 kg/m^3 بسبب أحجام الركام الأصغر الموجودة في التدرج مما أدى إلى انخفاض الفراغات عند مقارنتها بالتدرجات الأخرى التي تم اختبارها، وقد أثر هذا أيضًا على المسامية التي لوحظ أنها الأقل عند 18.43%عند مقارنتها بالعينات الأخرى. هذا التحليل يتوافق تماماً مع المبادئ الهندسية للخرسانة النفاذة، حيث يكون هناك دائماً مفاضلة بين خصائص القوة ومعدل التسرب. إن اختيار التدرج المناسب يعتمد على المتطلبات الأساسية لأي مشروع. لقد حصلت معظم الأبحاث السابقة على مسامية في حدود 15–25٪ ومعدل تسرب 41910 mm/hr وقوة ضغط من 5.6 MPa إلى 21MPa بعد 28 يومًا من المعالجة، وهذا يوضح أن هناك علاقة بين تدرج الركام وقوة الضغط والكثافة ومعدل التسرب والمسامية كلها عوامل مهمة في إنتاج الخرسانة النفاذة.

7. التوصيات:

على ضوء نتائج هذا البحث تم التوصل إلى التوصيات التالية:

1.7. التوصيات التطبيقية (للمهندسين وصناع القرار في ليبيا):

بناءً على نتائج البحث، نوصي بالتطبيقات العملية الآتية:

1. تطبيقات في مجال إدارة مياه الأمطار:

أ- **أرصفة وممرات المشاة:** استخدام الخرسانة النفاذة في الأرصفة يساهم في:

- التخلص الفوري من مياه الأمطار، مما يقلل من تشكّل البرك وانزلاق المشاة.

- تغذية المياه الجوفية بدلاً من فقدانها في شبكات الصرف.
- تخفيف الحمل على شبكات الصرف الصحي في المدن الكبرى مثل طرابلس وبنغازي.

ب- **مواقف السيارات:** تعتبر مواقف السيارات من أفضل التطبيقات لهذا النوع من الخرسانة، حيث تسمح بتسرب مياه الأمطار مباشرة إلى التربة، مما يلغي الحاجة لتصميم قنوات صرف سطحية معقدة.

2. تطبيقات في المجالات الحضرية والزراعية:

أ- **الأرصفة الجانبية للطرق:** يمكن استخدامها كطبقة للأرصفة الجانبية لتقليل الجريان السطحي من الطرق السريعة.

ب- **أرضيات الحدائق العامة والمنتزهات:** تسمح بتسرب مياه الري والأمطار إلى جذور الأشجار مباشرة، مما يحافظ على رطوبة التربة ويقلل استهلاك المياه.

ج- **مواقف العربات في الأسواق والمجمعات التجارية:** للمساعدة في إدارة المياه بشكل فعال في المناطق ذات الكثافة المرورية العالية.

3. توصيات تصميمية وتنفيذية:

أ- **تطوير مواصفة قياسية ليبية:** الاعتماد على نتائج البحث وضع مواصفة ليبية لتصميم وتنفيذ الخرسانة النفاذة، تأخذ في الاعتبار خواص الركام المحلي والظروف المناخية.

ب- **نشر الوعي التقني:** عقد ورش عمل للمهندسين والمقاولين لشرح مزايا ومحددات واستخدامات الخرسانة النفاذة وآليات تنفيذها بشكل صحيح.

2.7. التوصيات البحثية المستقبلية (للباحثين والأكاديميين):

لتوسيع نطاق المعرفة المستفادة من هذا البحث، نوصي بالاتجاهات البحثية المستقبلية الآتية:

1. دراسة تأثير المواد المضافة (Admixtures):

- **الملدنات فائقة التأثير (Superplasticizers):** دراسة تأثير هذه المواد على تحسين قابلية تشغيل الخرسانة النفاذة دون التأثير سلباً على نسبة الفراغات ومعدل التسرب.

2. التعمق في دراسة خواص الركام المحلي:

أ- تأثير شكل وحجم الركام المستخدم على إنتاج الخرسانة النفاذة

ب- دراسة استخدام أنواع بديلة من الركام مثل الركام المعاد تدويره من مخلفات البناء والتشييد، لتقييم جدواه من الناحية البيئية والهندسية.

ج- تأثير الغبار الناعم الملتصق بالركام على أداء الخرسانة النفاذة، ومحاولة إيجاد معالجات مثلى للركام قبل الاستخدام.

3. دراسات الأداء طويل المدى والمتانة:

- **مقاومة الإنسداد:** دراسة مدى تعرض الخرسانة النفاذة للإنسداد بالغبار والأتربة في الجو الليبي، وتطوير طرق صيانة فعالة (مثل الكنس بالمكنسة أو الغسيل بالضغط).

4. دراسات اقتصادية:

- **دراسة الجدوى الاقتصادية:** حساب التكلفة الكاملة (بداية وتشغيل وصيانة) لمشاريع الخرسانة النفاذة مقارنة بالحلول التقليدية في السياق الليبي.

8. المراجع:

1. Chandrappa, A. & Biligiri, P. (2017), "Flexural-fatigue characteristics of pervious concrete: Statistical distributions and model development," Constr. Build. Mater., vol. 153, pp. 1–15.
2. Pervious Concrete Pavements Paul D.Tennis, Michael L. Leming & David J. Akers (2004).
3. Ibrahim, A., Razak, A.& Abutaha, F. (2017), "Strength and abrasion resistance of palm oil clinker pervious concrete under different curing method," Constr. Build. Mater., vol. 147, pp. 576–587.
4. Sahraiyanjahromi, F.& Mosaberpanah, M. (2018), "Survey of sustainable criteria on building design," vol. 1, no. 1, pp. 30–36.
5. Joshaghani, A., Ramezanianpour, A., Ataei, O.& Golroo, A. (2015), "Optimizing pervious concrete pavement mixture design by using the Taguchi method," Constr. Build. Mater., vol. 101, pp. 317–325.
6. Lian, C., Zhuge, Y.& Beecham, S. (2011), "The relationship between porosity and strength for porous concrete," Constr. Build. Mater., vol. 25, no. 11, pp. 4294–4298.
7. Hanh, D., Sebaibi, N., Boutouil, M., Leleyter, L.& Baraud, F. (2014), "A modified method for the design of pervious concrete mix," Constr. Build. Mater., vol. 73, pp. 271–282.
8. Hanh, D., Boutouil, M. Sebaibi, N., Baraud, F. & Leleyter, L. (2017), "Durability of pervious concrete using crushed seashells," Constr. Build. Mater., vol. 135, pp. 137–150.
9. Zhong, R.& Wille, K. (2015), "Material design and characterization of high-performance pervious concrete," Constr. Build. Mater., vol. 98, pp. 51–60.