

تحليل الاستجابة الميكانيكية للخرسانة باستخدام المحاكاة العددية ببرنامج Abaqus لدعم اتخاذ القرار الهندسي في المنشآت الساحلية

طارق خليفة خليفة فليف¹، نوري عبد السلام علي عمر²، عبد المنعم الهادي عبدالله³، عبد العزيز محمد عمر طرنبة⁴، محمد بركة علي بلومي⁵
^{1,2,3} المعهد العالي لتقنيات علوم البحار صبراتة – ليبيا
^{4,5} باحث الأكاديمية الليبية للدراسات العليا جنزور – ليبيا

Analysis of the Mechanical Response of Concrete Using Numerical Simulation with Abaqus Software to Support Engineering Decision-Making for Coastal Structures

Tariq Khalifa Khalifa Fleifel¹, Nouri Abdulsalam Ali Omar², Abdelmonem El-Hadi Abdullah Abdullah³, Abdulaziz Mohamed Omar Tarnaba⁴, Mohamed Baraka Ali Balloumi⁵

^{1, 2, 3} Higher Institute of Marine Science and Technology, Sabratha – Libya

^{4, 5} Researchers, Libyan Academy for Postgraduate Studies, Janzour – Libya

Corresponding Author: Nuri.omer@himsts.edu.ly

تاريخ الاستلام: 2026/8/10 تاريخ المراجعة: 2026/8/12 تاريخ القبول: 2026/8/30- تاريخ النشر: 2026/9/15

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير الانخفاض التدريجي في مقاومة الضغط على الاستجابة الميكانيكية للخرسانة المحتوية على ثلاثة أنواع من الرمل المحلي، هي رمل شط الهنشير وزليتة وسيدي السائح، باستخدام المحاكاة العددية ببرنامج Abaqus. اعتمدت الدراسة على بيانات تجريبية منشورة عند عمر 28 يوماً لبناء النموذج العددي والتحقق منه، ثم أنشئت حالات عددية بخفض مقاومة الضغط بنسبة 10% و20% و30% مع ثبات بقية شروط النموذج. أظهر التحقق توافقاً جيداً بين النتائج العددية والتجريبية، حيث بلغ متوسط الخطأ النسبي المطلق في مقاومة الضغط 1.685%. بينت النتائج حدوث تراجع منتظم في الحمل والإجهاد الأقصى مع ثبات السلوك العام لمنحنيات الإجهاد والانفعال واستمرار مرحلة التليين (Post-peak Strain Softening)، مما يعطي استقرار الاستجابة الميكانيكية للمادة رغم تدهور مقاومتها. كما أظهرت المقارنة تفوق رمل شط الهنشير بتحقيقه أعلى مستويات التحمل الميكانيكي عبر كافة حالات الخفض، يليه رمل زليتة، بينما سجل رمل سيدي السائح أدنى المستويات. وتدعم هذه النتائج اعتماد رمل شط الهنشير كخيار استراتيجي عالي الأداء للمنشآت الساحلية. الكلمات المفتاحية: رمل الخرسانة؛ مقاومة الضغط؛ الاستجابة الميكانيكية؛ المحاكاة العددية؛ المنشآت الساحلية.

Abstract

This study evaluates the effect of a gradual reduction in compressive strength on the mechanical response of concrete containing three local sand types: Shatt Al Hensher, Zliten, and Sidi Al Sayeh, using numerical simulation in Abaqus. Published experimental data at 28 days were used to develop and verify the numerical model. Additional numerical cases were then generated by reducing the compressive strength by 10%, 20%, and 30%, while keeping the remaining model conditions unchanged. The verification showed good agreement between the numerical and experimental results, with a mean absolute relative error of 1.685% in compressive strength. The results revealed a consistent decline in both peak load and maximum stress, while maintaining the overall characteristics of the stress-strain curves and preserving the post-peak strain-softening behavior. This reflects the stability of the material's mechanical response despite the degradation of its compressive strength. Furthermore, comparative analysis demonstrated the superiority of Shat Al-Hanshir sand, which achieved the highest level of mechanical performance across all reduction scenarios, followed by Zliten sand, whereas Sidi As-Sayeh sand recorded the lowest values. These findings support the selection of Shat Al-Hanshir sand as a strategic, high-performance option for coastal structures.

Keywords: Concrete sand; compressive strength; mechanical response; numerical simulation; coastal structures.

1. المقدمة

تُعد الخرسانة من أكثر المواد استخداماً في المنشآت الهندسية، ويُعد تقييم سلوكها الميكانيكي من المؤشرات الأساسية للحكم على أداؤها تحت الأحمال المختلفة. وتتأثر هذه الاستجابة بخصائص مكونات الخلطة، ومن بينها الركام الناعم الذي يمثل جزءاً مهماً من البنية الداخلية للخرسانة، ويمكن لاختلاف

مصدره وخصائصه الحبيبية أن ينعكس على مقاومتها وخواصها الميكانيكية. وقد أظهرت دراسات تجريبية تناولت أنواعاً ومصادر مختلفة من الركام الناعم وجود اختلافات في أداء الخرسانة ومقاومتها تبعاً لنوع المادة المستخدمة [1]، [2].

تكتسب دراسة الأداء الميكانيكي أهمية أكبر عند ارتباط الخرسانة بالمنشآت الساحلية، حيث تتعرض هذه المنشآت خلال فترة خدمتها لظروف بيئية متغيرة قد تؤثر في خواص الخرسانة مع الزمن. وقد تناولت دراسات مختلفة الأداء الميكانيكي للخرسانة تحت ظروف بحرية ومدينة، من خلال متابعة مقاومة الضغط ومعامل المرونة وسلوك الإجهاد-الانفعال ومؤشرات أخرى مرتبطة بالاستجابة الميكانيكية [3]، [4]. وتوضح هذه الدراسات أهمية تقييم قدرة الخرسانة على المحافظة على أدائها الميكانيكي عند حدوث تغير في مستوى مقاومتها، بدلاً من الاكتفاء بتقييم حالتها الابتدائية.

في الوقت نفسه، وفرت المحاكاة العددية باستخدام طريقة العناصر المحدودة إمكانيات واسعة لتمثيل السلوك غير الخطي للخرسانة ودراسة الاستجابة قبل المقاومة القصوى وبعدها وتطور الضرر وأنماط الفشل. وقد استُخدمت نماذج الضرر والدونة، ومن بينها (Concrete Damage Plasticity (CDP)، في دراسات عديدة لتمثيل السلوك الميكانيكي للخرسانة وربط النتائج العددية بالبيانات التجريبية [5]، [6]. ومن هنا تبرز الحاجة إلى توظيف المحاكاة العددية لدراسة تأثير التغير في مستوى مقاومة الخرسانة على استجاباتها الميكانيكية بصورة منظمة وقابلة للمقارنة بين أنواع مختلفة من الرمل. وعليه، تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير الانخفاض التدريجي في مقاومة الضغط على الاستجابة الميكانيكية للخرسانة المحتوية على أنواع مختلفة من الرمل، ومتابعة مدى تأثير استقرارها وأدائها الميكانيكي بهذا الانخفاض، وصولاً إلى تحديد النوع الذي يحافظ على أفضل استقرار وأداء، بما يجعله الأكثر ملاءمة للاستخدام في المنشآت الساحلية.

1.2 الدراسات السابقة

تناولت دراسات سابقة تأثير خصائص الرمل ونوعه في الأداء الميكانيكي للخرسانة، وتزداد أهمية هذه النتائج عند التركيز على الرمال المحلية. فقد درس Madi et al ثلاثة أنواع من الرمال الليبية، هي شط الهنشير وزليتن وسيدي السائح، وأظهرت النتائج اختلافاً في مقاومة الضغط بعد 28 يوماً [7]. كما أوضح Hasdemir et al أن الاختلاف في التركيب المعدني والكيميائي للرمل الطبيعي يمكن أن يرتبط باختلاف مقاومة الخرسانة، في حين بين Bouziani أن تغيير نوع الرمل ونسبته في الخلطة يؤثر في مقاومة الضغط [8]، [9]. وأظهرت Benabed et al كذلك اختلاف الخواص بين الخلطات المصنوعة باستخدام أنواع مختلفة من الرمل [10].

اتجهت دراسات أخرى إلى بحث أثر دمج أنواع متعددة من الرمال في الخواص الميكانيكية للمواد الأسمنتية. فقد درست Douara and Guettala أنظمة ثلاثية من الرمل، وأظهرت النتائج اختلاف الخواص الفيزيائية والميكانيكية باختلاف تركيب الرمل، مع تحقيق بعض التركيبات مقاومة ضغط أعلى من غيرها [11]. كما استخدم Nécira et al منهج تصميم الخلطات لدراسة خلطات تحتوي على ثلاثة أنواع من الرمل، وأظهرت النتائج اختلاف المقاومة الميكانيكية باختلاف تركيب الخلطة ونوع الرمل المستخدم [12]. وتؤكد هذه الدراسات أن اختلاف نوع الرمل وتركيبه يمكن أن يؤدي إلى اختلاف فعلي في الاستجابة الميكانيكية للخرسانة والمواد الأسمنتية.

وفي الجانب المرتبط بالظروف الساحلية، درس He and Zhou الخصائص الميكانيكية لخرسانة رمل البحر في بيئة بحرية محاكاة، وأظهرت النتائج اختلاف سلوك التغير في المقاومة الميكانيكية باختلاف نوع الخرسانة [13]. كما تناول Qiao et al مقاومة الضغط ومنحنيات الإجهاد-الانفعال ومعامل المرونة للخرسانة المحتوية على ماء البحر ورمل البحر تحت تغيرات بنية دورية [14]. وتوفر هذه الدراسات أساساً لفهم أهمية متابعة التغير في الأداء الميكانيكي عند تغير الظروف المحيطة، إلا أنها لا تتناول بصورة مباشرة المقارنة بين أنواع رمال محلية تحت مستويات متدرجة من انخفاض مقاومة الضغط. ومن ثم تركز الدراسة الحالية على هذا الجانب باستخدام المحاكاة العددية ببرنامج Abaqus، اعتماداً على مستويات محددة من الانخفاض وإجراء مقارنة مباشرة بين أنواع الرمل المختلفة.

3. المنهجية

3.1 مصادر جمع البيانات والمواد المرجعية

ركزت الدراسة الحالية على بيانات تجريبية منشورة بوصفها أساساً لبناء النموذج العددي والتحقق من قدرته على تمثيل السلوك الميكانيكي للخرسانة. وقد تناولت دراسة Madi et al ثلاثة أنواع من الرمل المحلي، هي رمل شط الهنشير ورمل زليتن ورمل سيدي السائح، باستخدام أسمنت مصنع البرج، وشملت الدراسة عدداً من الاختبارات للخواص الفيزيائية والميكانيكية، من بينها مقاومة الضغط عند عمر 28 يوماً [7].

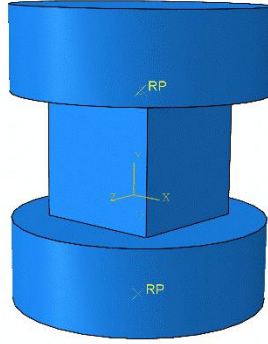
تم اعتماد نتائج مقاومة الضغط عند عمر 28 يوماً من الحالات التجريبية كأساس للتحليل العددي. وبالنسبة إلى كل نوع من أنواع الرمل، تم أخذ المتوسط الحسابي لنتائج العينات الثلاث المختبرة، بحيث تمثل القيمة المتوسطة الأداء الميكانيكي لذلك النوع بدلاً من الاعتماد على نتيجة عينة مفردة. كما تم الاستناد إلى بيانات الحمل الأقصى ومقاومة الضغط والأبعاد الهندسية للعينات المرتبطة باختبار الضغط بوصفها مدخلات أساسية لتمثيل الحالة التجريبية بصورة عددية.

بناءً على هذه البيانات، اعتُبرت خلطات الخرسانة المحتوية على أنواع الرمل الثلاثة باستخدام أسمنت البرج حالات مرجعية تمثل مستوى المقاومة الأساسي لكل نوع. وبلغت مقاومة الضغط المرجعية عند عمر 28 يوماً 79.23 MPa لرمل شط الهنشير، و 79.10 MPa لرمل زليتن، و 67.39 MPa لرمل سيدي السائح. وانطلاقاً من هذه القيم المرجعية، تم إنشاء حالات عددية إضافية من خلال خفض مقاومة الضغط تدريجياً بنسب 10% و 20% و 30% لكل نوع من أنواع الرمل، بهدف دراسة أثر هذا الانخفاض في الاستجابة الميكانيكية ومقارنة مدى محافظة كل نوع على أدائه

واستقراره مع تراجع مستوى المقاومة.

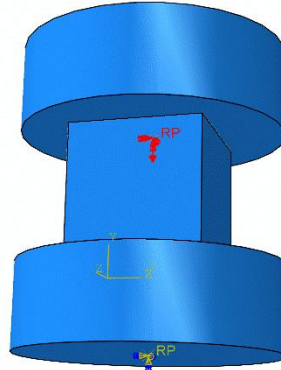
2.3 هندسة النموذج العددي في Abaqus

أنشئ النموذج العددي في برنامج Abaqus لتمثيل اختبار الضغط المعملية بصورة ثلاثية الأبعاد، حيث تم إنشاء العينة الخرسانية على هيئة مكعب بأبعاد $150 \times 150 \times 150$ mm، إلى جانب إعداد قاعدتي الضغط العلوية والسفلية بما يحاكي جهاز الاختبار المستخدم عملياً، وتعريفهما كأجسام صلبة (Rigid Bodies). كما تم تعريف خصائص المادة للخرسانة بصورة مستقلة لكل حالة مدروسة، وفقاً للبيانات المتاحة والخصائص التي تم الحصول عليها من الدراسات السابقة.



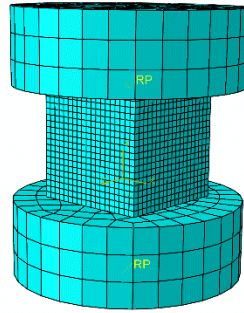
شكل (1): النموذج العددي وترتيب العينة بين قاعدتي الضغط.

بعد استكمال بناء النموذج وتجميع مكوناته، تم اختيار نوع التحليل Static, General، وتعريف التفاعل بين سطح العينة الخرسانية وقاعدتي الضغط باستخدام Normal Behavior و Tangential Behavior، مع معامل احتكاك مقداره $\mu=0.20$ ، استناداً إلى الدراسات التي أشارت إلى أن معامل الاحتكاك بين الخرسانة والفولاذ يقع ضمن نطاق يتراوح بين 0.2 و 0.6، كما استخدمت نماذج عددية قيمة $\mu=0.20$ ضمن عملية المعايرة وحقق توافقاً جيداً مع النتائج التجريبية [15]، [16]. كما تم تثبيت القاعدة السفلية بالكامل، في حين طبقت على القاعدة العلوية إزاحة رأسية باتجاه الأسفل مقدارها 1.5 mm لمحاكاة التحميل الضاغط.



شكل (2): شروط الحدود والإزاحة المطبقة على النموذج.

بعد ذلك، تم إعداد الشبكة (Meshing) العددية للمكعب باستخدام حجم عنصر قدره 30 mm، في حين استُخدم حجم عنصر قدره 8 mm لقاعدتي الضغط، مع اختيار أبعادهما بما يكفي لتغطية كامل سطح المكعب.



شكل (3): الشبكة العددية المستخدمة في النموذج.

وبعد اكتمال إعداد النموذج، تم إنشاء وتشغيل الـ Job، ثم استخراج النتائج العددية اللازمة للانتقال إلى مرحلة التحقق والمعايرة.

4. نتائج المحاكاة العددية

1.4 التحقق من النموذج العددي

اعتمد التحقق من النموذج العددي على مقارنة النتائج الناتجة من المحاكاة العددية بالنتائج التجريبية المتاحة للحالات المرجعية الثلاث، والمتمثلة في خلطات أسمنت البرج مع رمل شط الهنشير ورمل زليتن ورمل سيدي السائح. وأجريت المقارنة على أساس مقاومة الضغط عند عمر 28 يومًا، باعتبارها المؤشر الميكانيكي الأساسي المتاح بصورة مباشرة من البيانات التجريبية. كما استُخدمت حالة أسمنت البرج مع رمل شط الهنشير كأساس للمعايرة، ثم طبقت المنهجية نفسها على حالتَي رمل زليتن ورمل سيدي السائح للتحقق من قدرة النموذج على تمثيل الحالات المرجعية الثلاث.

جدول (1): نتائج التحقق من النموذج العددي للحالات المرجعية.

نوع الرمل	التجريبية (MPa)	العددية (MPa)	الخطأ (%)
شط الهنشير	MPa 79.23	MPa 79.28	0.063%
زليتن	MPa 79.10	MPa 76.56	3.211%
سيدي السائح	MPa 67.39	MPa 66.19	1.781%
متوسط الخطأ النسبي المطلق	—	—	1.685%

أظهرت المقارنة توافقًا جيدًا بين النتائج العددية والتجريبية للحالات المرجعية. ففي حالة رمل شط الهنشير، بلغت مقاومة الضغط العددية 79.28 MPa مقارنةً بالقيمة التجريبية البالغة 79.23 MPa، وبخطأ نسبي مطلق قدره 0.063%. وفي حالة رمل زليتن، بلغت المقاومة العددية 76.56 MPa مقابل 79.10 MPa تجريبيًا، وبخطأ نسبي مطلق قدره 3.211%. أما في حالة رمل سيدي السائح، فقد بلغت المقاومة العددية 66.19 MPa مقارنةً بالقيمة التجريبية البالغة 67.39 MPa، وبخطأ نسبي مطلق قدره 1.781%.

بلغ متوسط الخطأ النسبي المطلق للحالات الثلاث 1.685%، وهو ما يشير إلى توافق جيد بين النتائج العددية والتجريبية ضمن نطاق الحالات المرجعية المدروسة. وبناءً على هذا التوافق، تم اعتماد النموذج أساسًا لإجراء التحليل العددي للحالات البارامترية اللاحقة.

2.4 الدراسة البارامترية

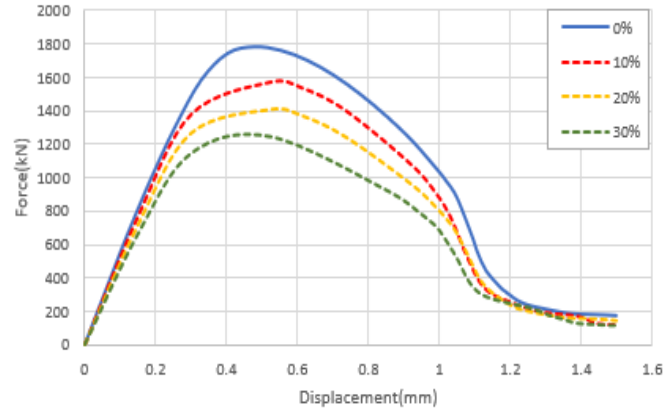
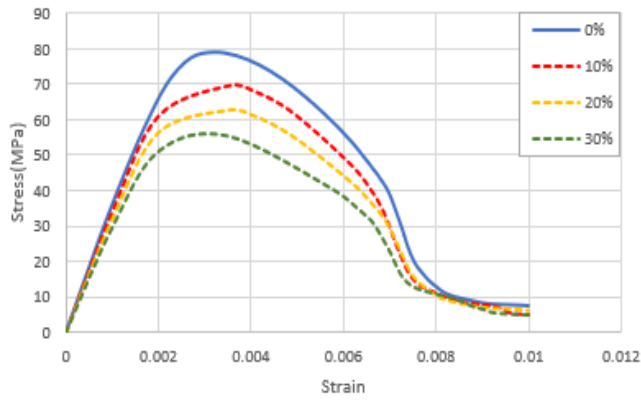
1. تأثير انخفاض مقاومة الضغط على خرسانة رمل شط الهنشير

توضح هذه الحالة تأثير خفض مقاومة الضغط تدريجيًا على خرسانة رمل شط الهنشير، من خلال مقارنة الحالة المرجعية مع حالات خفض بنسبة 10% و20% و30%، مع ثبات بقية شروط النموذج، وذلك لتتبع التغير في الاستجابة الميكانيكية وتطور الضرر داخل العينة.

جدول (2): نتائج المحاكاة العددية لخرسانة رمل شط الهنشير عند مستويات خفض مقاومة الضغط المختلفة.

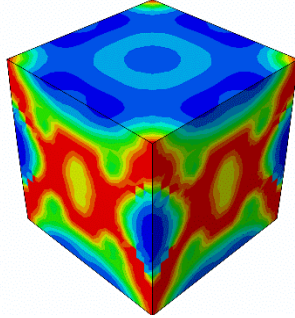
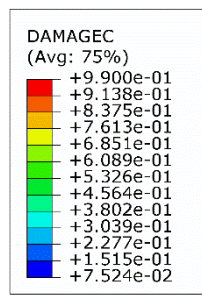
نسبة الخفض	الحمل الأقصى (kN)	الإزاحة القصوى (mm)	الإجهاد الأقصى (MPa)	الانفعال الأقصى
0% (مرجعي)	1783.71	0.478	79.28	0.00319
10%	1567.90	0.525	69.68	0.00350
20%	1408.24	0.525	62.59	0.00350
30%	1246.34	0.525	55.39	0.00350

يبين الجدول تراجع مقاومة الضغط والحمل الأقصى مع زيادة نسبة الخفض؛ إذ انخفضت مقاومة الضغط من 79.28 MPa والحمل الأقصى من 1783.71 kN في الحالة المرجعية إلى 69.68 MPa و 1567.90 kN عند خفض 10%، ثم إلى 62.59 MPa و 1408.24 kN عند 20%، وصولاً إلى 55.39 MPa و 1246.34 kN عند 30%. وفي المقابل، ارتفعت الإزاحة المصاحبة للحمل الأقصى من نحو 0.478 mm إلى نحو 0.525 mm، مع تغير محدود في الانفعال عند بلوغ الإجهاد الأقصى. ويشير ذلك إلى أن زيادة نسبة الخفض أثرت بصورة أساسية في مستوى المقاومة والحمل الذي تصل إليه العينة.

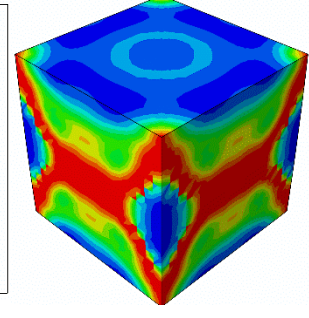
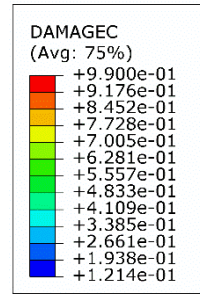


الشكل (4): منحنى القوة-الإزاحة (Force-Displacement)، ومنحنى الإجهاد-الانفعال (Stress-Strain) لرمل شط الهنشير.

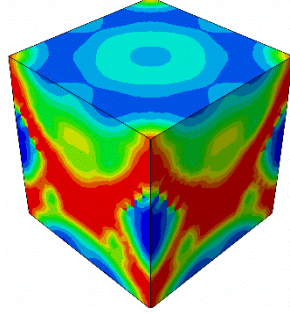
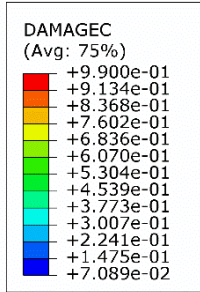
يُظهر منحنى القوة-الإزاحة (Force-Displacement) تزايد الحمل مع الإزاحة خلال مرحلة التحميل الأولى، ثم يتباطأ معدل الزيادة مع الاقتراب من الحمل الأقصى، قبل الانتقال إلى مرحلة ما بعد الحمل الأقصى التي يستمر خلالها التشوه مع انخفاض تدريجي في الحمل. ومع زيادة نسبة الخفض، تنتقل الاستجابة إلى مستويات حمل أقل، ويصبح الفرق عن الحالة المرجعية أكثر وضوحاً، خاصة عند 30%. كما يعطي منحنى الإجهاد-الانفعال (Stress-Strain) الاتجاه نفسه، حيث تنخفض مقاومة الضغط تدريجياً من 79.28 MPa إلى 69.68 ثم 62.59 و 55.39 MPa، مع استمرار مرحلة التليين بعد الحمل الأقصى (Post-peak Strain Softening) في الحالات المدروسة. ويشير استمرار الاستجابة بعد الوصول إلى أقصى حمل إلى بقاء جزء من قدرة الخرسانة على تحمل التشوه بعد بدء تطور الضرر، مع انخفاض مستوى الإجهاد الذي يمكن أن تتحمله كلما ارتفعت نسبة الخفض.



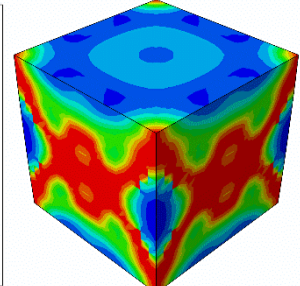
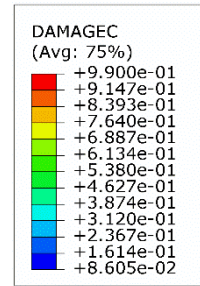
(ب): تضرر الضغط عند نسبة 10%



(أ): تضرر الضغط عند نسبة 0%



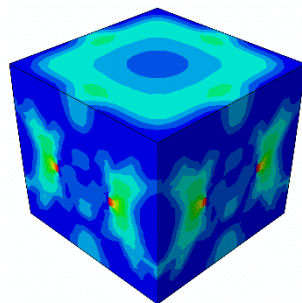
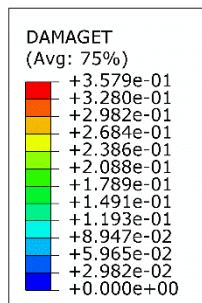
(د): تضرر الضغط عند نسبة 30%



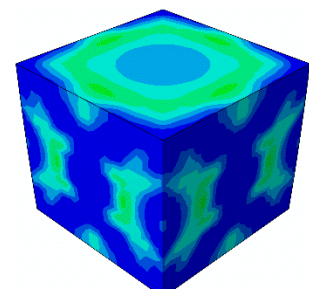
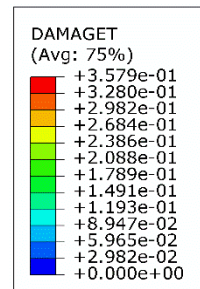
(ج): تضرر الضغط عند نسبة 20%

الشكل (5): خرائط ضرر الضغط (Damage Compression) لحالات رمل شط الهنشير.

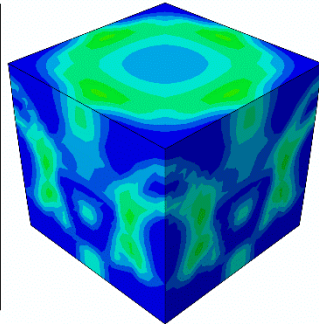
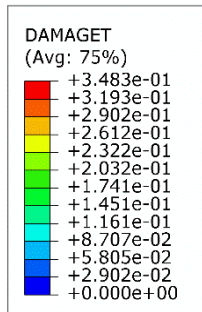
توضح خرائط ضرر الضغط (Damage Compression) للحالات الأربع أن الضرر يتركز بصورة رئيسية في مناطق محددة من العينة، مع ظهور مناطق ذات قيم مرتفعة. وقد بلغت القيمة العظمى المسجلة في الخرائط نحو 0.990 في جميع الحالات، إلا أن توزيع المناطق ذات الضرر المرتفع واتساعها يختلف بين الحالات، ويظهر بصورة أكثر امتداداً في المناطق الجانبية والوسطى للعينة مع زيادة نسبة الخفض، ويصبح ذلك أكثر وضوحاً عند 20% و 30%. وتشير هذه النتائج إلى أن خفض مقاومة الضغط لم يغيّر القيمة القصوى للضرر الانضغاطي في النتائج النهائية، وإنما انعكس بصورة أكبر على توزيع وانتشار مناطق الضرر داخل العينة.



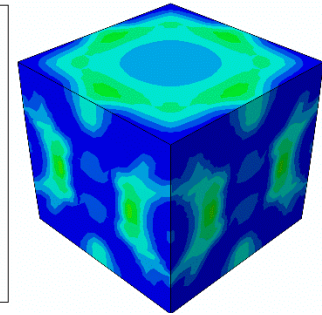
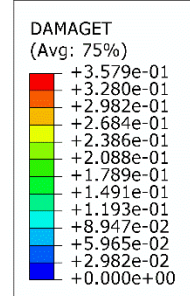
(ب): تضرر الشد عند نسبة 10%



(أ): تضرر الشد عند نسبة 0%



(د): تضرر الشد عند نسبة 30%



(ج): تضرر الشد عند نسبة 20%

الشكل (6): خرائط ضرر الشد (Damage Tension) لحالات رمل شط الهنشير.

أما خرائط ضرر الشد (Damage Tension) فتُظهر تركز الضرر بصورة أساسية في الأجزاء الجانبية من العينة، مع اختلاف واضح في شكل وانتشار المناطق المتضررة بين مستويات الخفض. بلغت القيمة العظمى للضرر الشدي نحو 0.358 في الحالة المرجعية، وظلت عند المستوى نفسه تقريباً في حالتي 10% و 20%، بينما انخفضت في حالة 30% إلى نحو 0.348. ويُظهر الانتقال بين الخرائط الأربع أن ارتفاع نسبة الخفض لم يؤدِّ إلى زيادة القيمة العظمى لضرر الشد في المرحلة النهائية، بل صاحبه تغير في نمط توزيع الضرر ومجاله المكاني داخل العينة، مع بقاء التركيز الأساسي في المناطق الجانبية المرتبطة بالإجهادات العرضية الناتجة عن الضغط المحوري، يمكن تفسير ذلك هندسياً في ضوء تأثير بواسون (Poisson's Effect) وما يصاحبه من إجهادات عرضية أثناء الضغط المحوري، مع احتمال تطور تشققات جانبية (Lateral Splitting) مع ارتفاع مستوى التشوه وانخفاض مقاومة المادة.

وتشير هذه النتائج إلى أن خفض مقاومة الضغط في الحالات المدروسة لخرسانة رمل شط الهنشير أدى بصورة أساسية إلى خفض مستوى الحمل والإجهاد الأقصى، في حين ظل النمط العام لمنحنيات الاستجابة قائماً، كما لم تتغير القيمة العظمى للضرر الانضغاطي النهائي، بينما أظهر الضرر الشدي تغيراً محدوداً في قيمته العظمى مع تغير واضح في توزيعه المكاني داخل الخرائط.

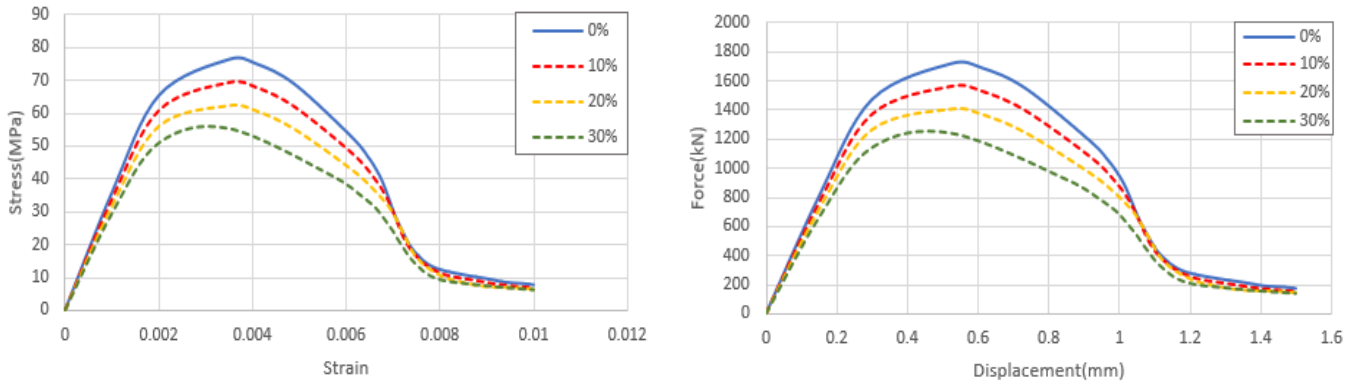
2.2.4 تأثير انخفاض مقاومة الضغط على خرسانة رمل زليتن

في هذا النوع من الرمل، تم تطبيق مستويات خفض مقاومة الضغط على خرسانة رمل زليتن لمتابعة أثر الانخفاض التدريجي في المقاومة على الاستجابة الميكانيكية، ومقارنتها بالحالة المرجعية.

جدول (3): نتائج المحاكاة العددية لخرسانة رمل زليتن عند مستويات خفض مقاومة الضغط المختلفة.

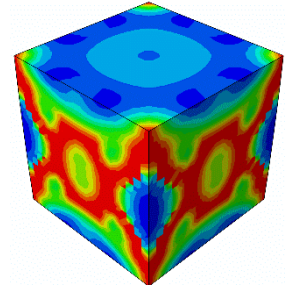
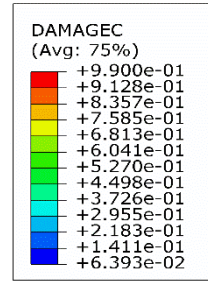
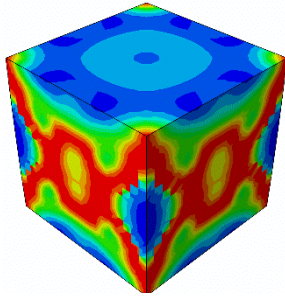
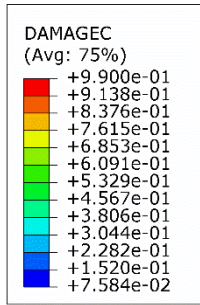
نسبة الخفض	الحمل الأقصى (kN)	الإزاحة القصوى (mm)	الإجهاد الأقصى (MPa)	الانفعال الأقصى
0% (مرجعي)	1722.99	0.525	76.58	0.00350
10%	1565.50	0.525	69.58	0.00350
20%	1406.21	0.525	62.50	0.00350
30%	1244.59	0.525	55.32	0.00350

توضح النتائج تدرج الحمل الأقصى من 1722.99 kN إلى 1244.59 kN، وانخفاض الإجهاد الأقصى من 76.58 MPa إلى 55.32 MPa مع الانتقال من الحالة المرجعية إلى خفض 30%، بينما ظلت الإزاحة والانفعال عند الحمل الأقصى متقاربين عند نحو 0.525 mm و 0.00350.



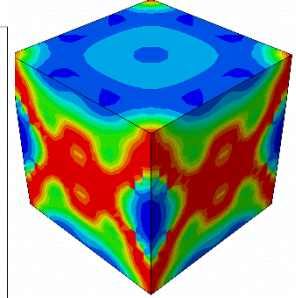
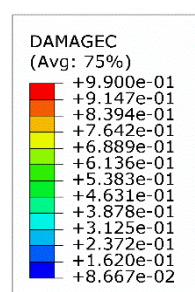
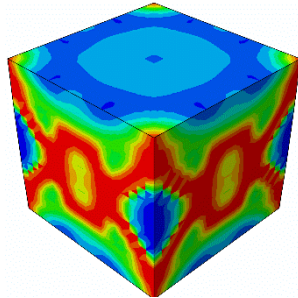
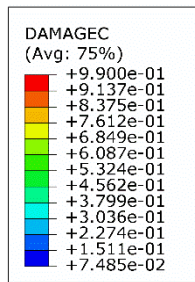
الشكل (7): منحنى القوة-الإزاحة (Force-Displacement)، ومنحنى الإجهاد-الانفعال (Stress-Strain) لحالات رمل زليتين.

يُظهر منحنى القوة-الإزاحة (Force-Displacement) أن الفروق بين الحالات تتضح بصورة أكبر بعد الوصول إلى الحمل الأقصى؛ إذ يزداد فقدان الحمل مع ارتفاع نسبة الخفض، ويصبح أكثر وضوحاً عند 30%. ويؤكد منحنى الإجهاد-الانفعال (Stress-Strain) هذا الاتجاه، مع انخفاض الإجهاد الأقصى واستمرار التليين بعد الحمل الأقصى (Post-peak Strain Softening) وامتداد الانفعال إلى مستويات أعلى في الحالة الأكثر انخفاضاً.



(ب): تضرر الضغط عند نسبة 10%

(أ): تضرر الضغط عند نسبة 0%

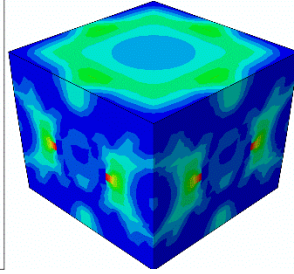
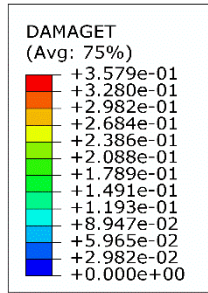


(د): تضرر الضغط عند نسبة 30%

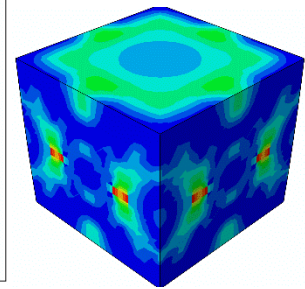
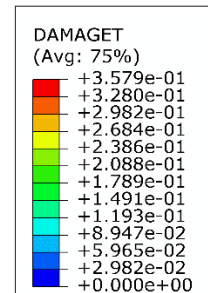
(ج): تضرر الضغط عند نسبة 20%

الشكل (8): خرائط ضرر الضغط (Damage Compression) لحالات رمل زليتين.

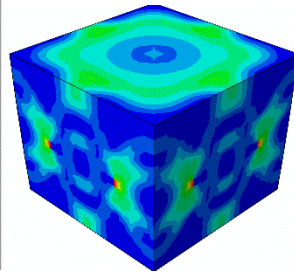
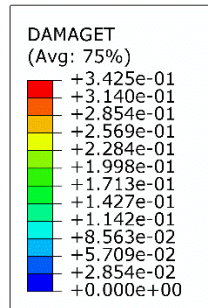
تُظهر خرائط ضرر الضغط (Damage Compression) تركيز الضرر في مناطق محددة من العينة، مع اتساع نطاقه بزيادة نسبة خفض المقاومة، ويظهر ذلك بصورة أوضح عند 20% و30%، حيث تبلغ القيمة العظمى الظاهرة في مقياس الخرائط نحو 0.990 في جميع الحالات، وعلى الرغم من ثبات القيمة العظمى، يظهر اختلاف في شكل وانتشار مناطق الضرر بين الحالات.



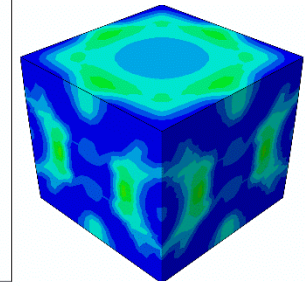
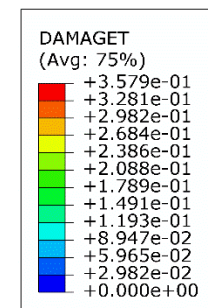
(ب): تضرر الشد عند نسبة 10%



(أ): تضرر الشد عند نسبة 0%



(د): تضرر الشد عند نسبة 30%



(ج): تضرر الشد عند نسبة 20%

الشكل (9): خرائط ضرر الشد (Damage Tension) للحالات رمل زليتين.

أما خرائط ضرر الشد (Damage Tension) فتُظهر تركيز الضرر في المناطق الجانبية، مع تغير في مدى انتشاره بين حالات الخفض، وبلغت القيمة العظمى للضرر الشدي نحو 0.3579 في الحالات 0% و10% و20%، بينما انخفضت إلى نحو 0.3425 عند خفض مقاومة الضغط بنسبة 30%، ويعود ذلك إلى تأثير نسبة بواسون (Poisson's Effect) وما يصاحبه من إجهادات عرضية، مع إمكانية تطور تشققات جانبية (Lateral Splitting) مع استمرار التشوه.

وتشير النتائج إلى أن خرسانة رمل زليتين حافظت أيضًا على سلوكها الميكانيكي العام مع انخفاض مقاومة الضغط، مع تراجع تدريجي في مستوى الحمل والإجهاد، وظهور التأثير بصورة أوضح في مرحلة ما بعد الحمل الأقصى عند ارتفاع نسبة الخفض، وكانت حالة 30% الأكثر تأثرًا ضمن الحالات المدروسة.

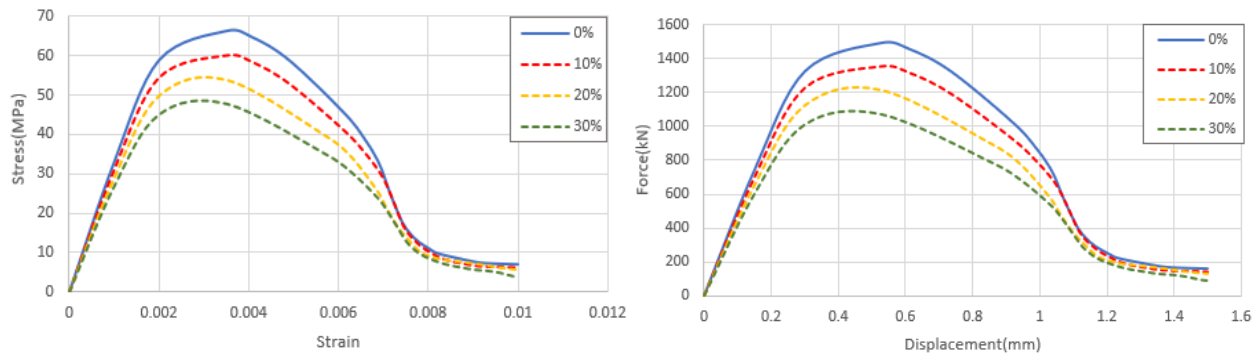
3.2.4 تأثير انخفاض مقاومة الضغط على خرسانة رمل سيدي السائح

كذلك في هذا النوع من الرمل، تم تطبيق مستويات خفض مقاومة الضغط على خرسانة رمل سيدي السائح لمتابعة أثر الانخفاض التدريجي في المقاومة على الاستجابة الميكانيكية، ومقارنتها بالحالة المرجعية.

جدول (4): نتائج المحاكاة العددية لخرسانة رمل سيدي السائح عند مستويات خفض مقاومة الضغط المختلفة.

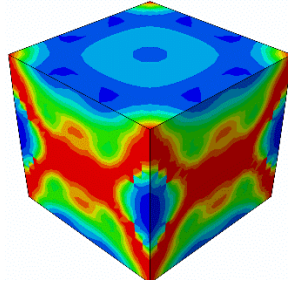
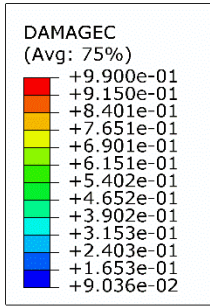
نسبة الخفض	الحمل الأقصى (kN)	الإزاحة القصوى (mm)	الإجهاد الأقصى (MPa)	الانفعال الأقصى
0% (مرجعي)	1489.38	0.525	66.19	0.00350
10%	1352.66	0.525	60.12	0.00350
20%	1214.41	0.525	53.97	0.00350
30%	1074.70	0.525	47.76	0.00350

توضح النتائج انتقال الحمل الأقصى من 1489.38 kN في الحالة المرجعية إلى 1352.66 ثم 1214.41 و 1074.70 kN عند خفض المقاومة بنسبة 10% و 20% و 30%، بينما تدرج الإجهاد الأقصى من 66.19 MPa إلى 60.12 ثم 53.97 و 47.76 MPa. وفي المقابل، بقيت الإزاحة والانفعال عند الحمل الأقصى متقاربين عند نحو 0.525 mm و 0.00350.

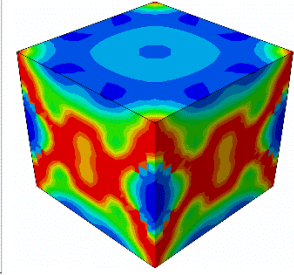
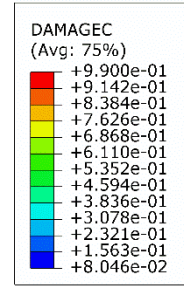


الشكل (10): منحنى القوة-الإزاحة (Force-Displacement)، ومنحنى الإجهاد-الانفعال (Stress-Strain) لحالات رمل سيدي السائح.

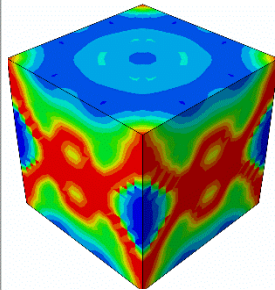
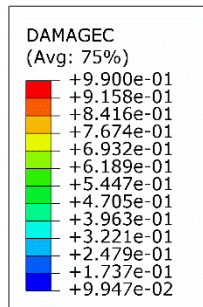
يُظهر منحنى القوة-الإزاحة (Force-Displacement) أن الفروق بين الحالات لا تقتصر على انخفاض الحمل الأقصى، بل تصبح أكثر وضوحاً مع استمرار الإزاحة بعده؛ إذ ينخفض الحمل بصورة أكبر كلما ارتفعت نسبة الخفض، وتظهر حالة 30% بأدنى مستوى للحمل خلال الجزء المتأخر من المنحنى. ويوضح منحنى الإجهاد-الانفعال (Stress-Strain) هذا الاتجاه، مع استمرار التليين بعد الحمل الأقصى (Post-peak Strain Softening) وامتداد الاستجابة إلى انفعالات أعلى عند مستويات الخفض المرتفعة.



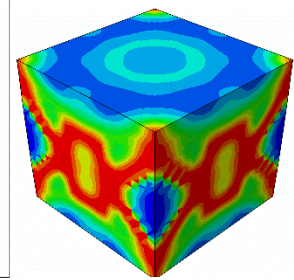
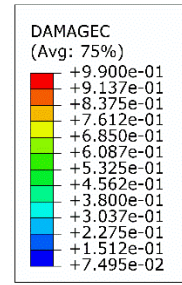
(ب): تضرر الضغط عند نسبة 10%



(أ): تضرر الضغط عند نسبة 0%



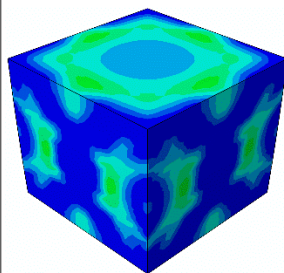
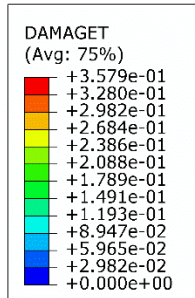
(د): تضرر الضغط عند نسبة 30%



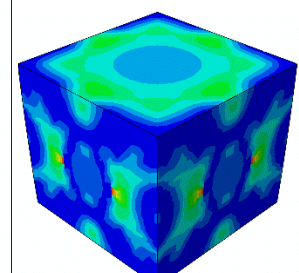
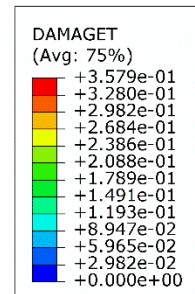
(ج): تضرر الضغط عند نسبة 20%

الشكل (11): خرائط ضرر الضغط (Damage Compression) للحالات رمل سيدي السائح.

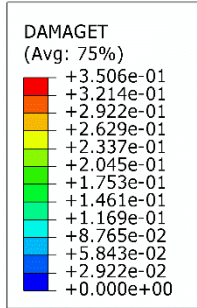
تُظهر خرائط ضرر الضغط (Damage Compression) تركزاً واضحاً للضرر في مناطق محددة من العينة، مع امتداد المناطق المتضررة عبر حالات الخفض المختلفة، وبلوغ قيمة الضرر العظمى نحو لكل 0.990 لكل الحالات. مع ظهور اختلاف في شكل وانتشار مناطق الضرر بين كل حالة.



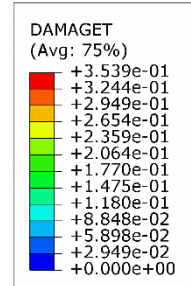
(ب): تضرر الشد عند نسبة 10%



(أ): تضرر الشد عند نسبة 0%



(د): تضرر الشد عند نسبة 30%



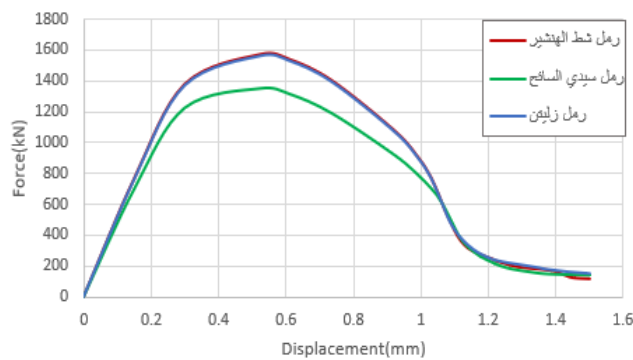
(ج): تضرر الشد عند نسبة 20%

الشكل (12): خرائط ضرر الشد (Damage Tension) للحالات رمل سيدي السائح.

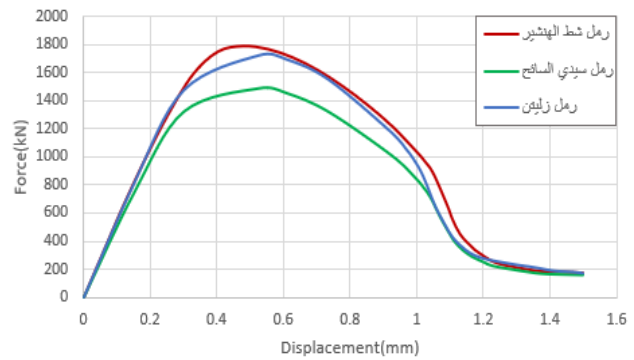
أما ضرر الشد (Damage Tension) فتُظهر خرائطه أن القيمة العظمى بلغت نحو 0.358 في الحالات الأولى، ثم انخفضت تدريجيًا مع زيادة نسبة الخفض لتصل إلى نحو 0.351 عند خفض 30%، مع تمركز الضرر بصورة أساسية في الأجزاء الجانبية. ويمكن تفسير هذا التوزيع في إطار تأثير بواسون (Poisson's Effect) والإجهادات العرضية المصاحبة للضغط، مع إمكانية تطور تشققات جانبية (Lateral Splitting) مع استمرار التشوه. وتشير النتائج إلى أن خرسانة رمل سيدي السائح حافظت أيضًا على النمط العام لاستجابتها الميكانيكية مع انخفاض مقاومة الضغط، مع استمرار الانخفاض التدريجي في الحمل والإجهاد الأقصى، بينما أصبحت آثار الخفض أكثر وضوحًا مع استمرار التشوه بعد الحمل الأقصى، وكانت حالة 30% الأكثر تأثيرًا ضمن الحالات المدروسة.

4.3 المقارنة بين أنواع الرمل عند مستويات الخفض في مقاومة الضغط

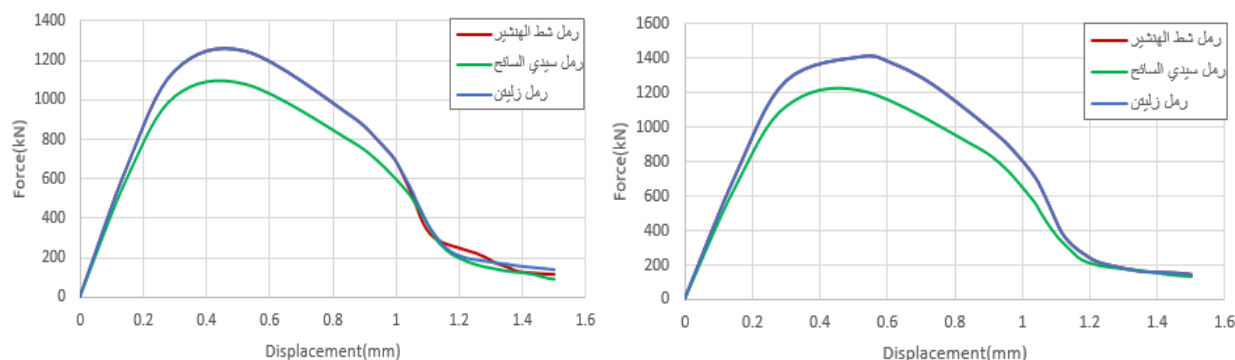
تُستخدم هذه المقارنة لتقييم مدى احتفاظ خلطات الرمل الثلاث بأدائها الميكانيكي مع انخفاض مقاومة الضغط، وتحديد مدى استمرار نمط الاستجابة



(ب): أنواع الرمل عند خفض مقاومة الضغط 10%.



(أ): أنواع الرمل عند الحالة المرجعية 0%.



(د): أنواع الرمل عند خفض مقاومة الضغط 30%.

(ج): أنواع الرمل عند خفض مقاومة الضغط 20%.

الشكل (13): مقارنة منحنيات القوة-الإزاحة (Force-Displacement) للأنواع الثلاثة عند خفض مقاومة الضغط.

تُظهر الحالة المرجعية تفاوتاً في مستوى التحمل الميكانيكي بين الخلطات الثلاث، حيث سجل رمل شط الهنشير أعلى حمل أقصى بلغ 1783.71 kN، يليه رمل زليتن بقيمة 1722.99 kN، ثم رمل سيدي السائح بقيمة 1489.38 kN. ومع خفض مقاومة الضغط، انخفض الحمل الأقصى لجميع الخلطات بصورة متدرجة، ليصل عند خفض 30% إلى 1246.34 kN لرمل شط الهنشير، و 1244.59 kN لرمل زليتن، و 1074.70 kN لرمل سيدي السائح. كما تقلص الفارق بين شط الهنشير وزليتن من 60.72 kN في الحالة المرجعية إلى نحو 1.75 kN عند خفض المقاومة بنسبة 30%.

وعلى مستوى شكل الاستجابة، حافظت المنحنيات على مسار متقارب بصورة عامة، مع وصول الحمل إلى قيمة قصوى ثم استمرار الانخفاض مع زيادة الإزاحة. ويشير ذلك إلى أن التأثير الرئيسي لخفض المقاومة ظهر في مقدار الحمل الذي تستطيع الخرسانة تحمله أكثر من حدوث تغير جوهري في النمط العام للاستجابة الميكانيكية.

وتوضح المقارنة أيضاً أن رمل زليتن احتفظ بنسبة أعلى قليلاً من أدائه المرجعي عند مستويات الخفض المختلفة، إلا أن هذا الاختلاف النسبي ظل محدوداً، في حين ظل رمل شط الهنشير محافظاً على أعلى مستوى من الأداء الميكانيكي في جميع حالات الخفض. أما رمل سيدي السائح، فقد حافظ بدوره على النمط العام للاستجابة، لكنه استمر عند مستوى أقل من الحمل مقارنة بالآخرين.

وعليه، تُظهر نتائج المقارنة أن انخفاض مقاومة الضغط أدى إلى انخفاض منتظم في مستوى الأداء الميكانيكي لجميع أنواع الرمل، مع بقاء النمط العام للاستجابة محافظاً على خصائصه. وبذلك تشير النتائج إلى أن خفض المقاومة ضمن الحالات المدروسة أثر أساساً في مستوى التحمل الميكانيكي، دون ظهور تغير جوهري في السلوك العام للخلطات الثلاث. كما أظهرت النتائج أن رمل شط الهنشير ظل محافظاً على أعلى مستوى من الأداء الميكانيكي في جميع حالات الخفض، مع تقارب واضح بينه وبين رمل زليتن عند مستويات الخفض الأعلى، في حين حافظ رمل سيدي السائح على نمطه العام رغم انخفاض مستوى تحمله مقارنة بالآخرين. واستناداً على النتائج التي تم الحصول عليها ضمن نطاق الدراسة الحالية أن رمل شط الهنشير أظهر أعلى مستوى من الأداء بين أنواع الرمل المدروسة، مما يدعم إمكانية ترشيحه للاستخدام في المنشآت الساحلية.

5. المناقشة

يتوافق الانخفاض التدريجي في الحمل والإجهاد الأقصى المصاحب لزيادة نسبة خفض مقاومة الضغط في الدراسة الحالية مع ما ورد في دراسة Wang et al. من تغير في الخواص الميكانيكية وعلاقات Stress-Strain للخرسانة تحت ظروف التعرض البحري، كما يتفق مع ما بينته دراسة He and Zhou من حدوث فقد في مقاومة الضغط لخرسانة رمل البحر مع دورات البلل والجفاف [3]، [13]. ويظل هذا التوافق مقصوراً على الاتجاه الميكانيكي للانخفاض، إذ تختلف آلية التغير في الدراسة الحالية عن الدراسات السابقة؛ فقد تم تمثيل الانخفاض هنا من خلال خفض عددي محدد لمقاومة الضغط، بينما ارتبط في الدراسات السابقة بظروف تعرض بحري فعلية.

كما أن استخدام نموذج (Concrete Damage Plasticity CDP) يحقق توافقاً في تمثيل السلوك غير الخطي وتطور الضرر في الدراسة الحالية مع ما استخدمه Huang et al. و Abdolpour and Sawicki في محاكاة السلوك والضرر والفشل في الخرسانة [5]، [6].

6. الاستنتاجات

1. حقق النموذج العددي توافقاً جيداً مع النتائج التجريبية، بمتوسط خطأ نسبي مطلق بلغ 1.685% في مقاومة الضغط.
2. أدى خفض مقاومة الضغط بنسبة 10% و 20% و 30% إلى انخفاض تدريجي في الحمل الأقصى والإجهاد الأقصى لجميع الحالات المدروسة.
3. حافظت منحنيات Force-Displacement و Stress-Strain على نمطها العام رغم انخفاض مستوى المقاومة.
4. حافظ رمل شط الهنشير على أعلى مستوى مطلق من الأداء الميكانيكي في جميع حالات الخفض، مع تقارب واضح مع رمل زليتن عند مستويات الخفض الأعلى.
5. ضمن نطاق الدراسة ومنظورها الميكانيكي، يدعم الأداء المسجل لرمل شط الهنشير ترشيحه للاستخدام في المنشآت الساحلية.

7. التوصيات

1. تطوير المحاكاة لتشمل تأثير التعرض البحري الفعلي على مقاومة الخرسانة بدل تمثيله فقط من خلال خفض عددي لمقاومة الضغط.
2. توسيع المقارنة مستقبلاً لتضم أنواعاً ومصادر أخرى من الرمل، بهدف تقييم خصائصها الفيزيائية والميكانيكية وربطها بأداء الخرسانة.
3. استكمال تقييم الرمال المدروسة من خلال دراسة مستقلة لتقييم متانتها وملاءمتها للاستخدام في البيئة الساحلية.

المراجع

- [1] A. M. Blash, A. Altomate, F. Alatshan, and A. A. A. Al-Sharif, "Properties of Concrete Produced Using Locally Available Aggregates in Libya," *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, vol. 5, no. 9, pp. 1480–1488, 2017.
- [2] F. J. Luo, L. He, Z. Pan, W. H. Duan, X. L. Zhao, and F. Collins, "Effect of very fine particles on workability and strength of concrete made with dune sand," *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 131–137, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.005.
- [3] J. Wang, T. Huang, X. Liu, P. Wu, and Z. Guo, "Mechanical Properties of Recycled Concrete in Marine Environment," *The Scientific World Journal*, vol. 2013, Art. no. 728357, 2013, doi: 10.1155/2013/728357.
- [4] M. S. Islam, B. C. Mondal, and M. M. Islam, "Effect of Sea Salts on Structural Concrete in a Tidal Environment," *Australian Journal of Structural Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 237–252, 2010, doi: 10.1080/13287982.2010.11465048.
- [5] Y. J. Huang, Z. J. Yang, X. W. Chen, and G. H. Liu, "Monte Carlo simulations of meso-scale dynamic compressive behavior of concrete based on X-ray computed tomography images," *International Journal of Impact Engineering*, 2016, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2016.06.009.
- [6] H. Abdolpour and B. Sawicki, "Analyzing fracture mechanism of high performance concrete using concrete damage plasticity model," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 25, Art. no. 241, 2025, doi: 10.1007/s43452-025-01287-3.
- [7] A. Madi, A. al Gayed, A. Ben Taher, and S. Abdou, "Study of the Physical, Mechanical and Chemical Properties of Sand (Shatt Al Hensher, Zliten and Sedi Al Sayha) and the possibility of using them in concrete," *Journal of Pure & Applied Sciences*, vol. 17, no. 1, pp. 40–47, 2018.
- [8] S. Hasdemir, M. Tuğrul, and M. Yılmaz, "The effect of natural sand composition on concrete strength," *Construction and Building Materials*, vol. 112, pp. 940–948, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.188.
- [9] T. Bouziani, "Assessment of fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete made with different sand types by mixture design modelling approach," *Construction and Building Materials*, vol. 49, pp. 308–314, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.039.
- [10] B. Benabed, E.-H. Kadri, L. Azzouz, and S. Kenai, "Properties of self-compacting mortar made with various types of sand," *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, no. 10, pp. 1167–1173, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.07.007.
- [11] T.-H. Douara and S. Guettala, "Effects of curing regimes on the physico-mechanical properties of self-compacting concrete made with ternary sands," *Construction and Building Materials*, vol. 195, pp. 41–51, 2019, doi:

10.1016/j.conbuildmat.2018.11.043.

[12] B. Nécira, M. Belkacem, and Y. Abadou, "Statistical analysis of high performance self-compacting mortar containing ternary sand mixtures," *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 5166–5171, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.694.

[13] X. He and J. Zhou, "Mechanical characteristics of sea-sand concrete in simulated marine environment," *Construction and Building Materials*, vol. 274, Art. no. 122098, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122098.

[14] S. Qiao, Z. Xiong, Y. Li, Z. Ye, S. He, L. Li, and Y. Zeng, "Mechanical Properties of Seawater Sea-Sand Concrete Exposed to Daily Temperature Variations," *Buildings*, vol. 12, no. 5, Art. no. 517, 2022, doi: 10.3390/buildings12050517.

[15] J. M. Adam, S. Ivorra, E. Giménez, J. J. Moragues, P. Miguel, C. Miragall, and P. A. Calderón, "Behaviour of axially loaded RC columns strengthened by steel angles and strips," *Steel and Composite Structures*, vol. 7, no. 5, pp. 405–419, 2007.

[16] J. Wang, X. Yu, Y. Fu, and G. Zhou, "A 3D Meso-Scale Model and Numerical Uniaxial Compression Tests on Concrete with the Consideration of the Friction Effect," *Materials*, vol. 17, no. 5, p. 1204, 2024, doi: 10.3390/ma17051204.