

## تقييم المتانة على المدى الطويل: دراسة عددية على مقاومة حديد التسليح في الهياكل الخرسانية المتآكلة

<http://www.doi.org/10.62341/blme1738>

د. بشير صالح، م. ليندا دقق، م. منى التركي

الأكاديمية الليبية للدراسات العليا

[bashir.saleh@academy.edu.ly](mailto:bashir.saleh@academy.edu.ly)

### الملخص:

التآكل (Corrosion) يمثل تحديًا رئيسيًا للهياكل الخرسانية المسلحة (Reinforced Concrete Structures)، حيث يؤدي إلى تقليل كفاءة حديد التسليح وبالتالي تدهور القوة والمتانة الهيكلية (Structural Strength and Durability) بمرور الوقت. تستهدف هذه الدراسة استكشاف تأثير التآكل على السلوك الإنشائي (Structural Behavior) للكمرات الخرسانية المسلحة المعرضة لبيئات قاسية (Harsh Environments) مثل الرطوبة العالية (High Humidity) والمواقع الساحلية، التي تسهم في تسريع التآكل. يشكل التآكل تهديدًا على سلامة الهياكل الخرسانية (Structural Safety)، حيث يؤدي إلى فقدان مساحة التسليح التصميمية (Design Reinforcement Area)، مما يقلل من قدرة التحمل (Load-Bearing Capacity) ويزيد من احتمالية الفشل الهيكلي (Structural Failure).

استخدمت الدراسة التحليل العددي (Numerical Analysis) بواسطة البرمجية ABAQUS لتقييم تأثير درجات مختلفة من التآكل على قدرة التحمل (Load Capacity) والتشوه النهائي (Final Deflection) للكمرات، بهدف تطوير استراتيجيات تصميم وصيانة (Design and Maintenance Strategies) أكثر فعالية لضمان سلامة الهياكل. تم إنشاء ثلاثة نماذج رقمية (Digital Models) لكمرات خرسانية بتآكل متفاوت في حديد التسليح، حيث تراوحت نسبة فقدان الحديد بين 20% و 25%. أظهرت النتائج أن التآكل يسبب انخفاضًا ملحوظًا في قدرة تحمل الأحمال وزيادة في التشوه النهائي، مما يعكس ضعفًا في الأداء الهيكلي للكمرات المتآكلة مقارنة بغير المتآكلة. أظهرت الدراسة علاقة شبه خطية (Quasi-Linear Relationship) بين زيادة نسبة التآكل وانخفاض قدرة التحمل، مما يشير إلى أن حتى التآكل بدرجات منخفضة قد يؤثر بشكل كبير على السلامة الإنشائية (Structural Safety). تبرز الدراسة أهمية استخدام أدوات التحليل العددي المتقدمة (Advanced Numerical Tools) مثل ABAQUS لتقييم تأثير التآكل بدقة. توصي الدراسة بتبني استراتيجيات صيانة استباقية (Proactive Maintenance Strategies) للهياكل في البيئات القاسية، تشمل استخدام تقنيات مقاومة التآكل (Corrosion-Resistant Techniques) مثل الحماية الكاثودية (Cathodic Protection) أو مواد تسليح مقاومة للتآكل، وتطوير معايير تصميم جديدة تأخذ بعين الاعتبار تأثير التآكل على العمر الافتراضي (Service Life) للهياكل الخرسانية المسلحة.

الكلمات الدالة: تآكل (Corrosion)، حديد التسليح (Reinforcement)، التشوه (Deflection)، التحليل العددي (Numerical Analysis)، ABAQUS، FE Modeling

## "Assessing Long-term Durability: Numerical Study on Reinforcement Steel Resistance In Corroded Concrete Structures"

D. Bashir Saleh, M. Linda Dakdak, M. Mona Al-Turki

Libyan Academy for Postgraduate Studies  
bashir.saleh@academy.edu.ly

### Abstract

Corrosion is one of the primary challenges facing reinforced concrete structures, as it degrades the efficiency of reinforcement steel, leading to a decline in structural strength and durability over time. This study aims to investigate the effect of corrosion on the structural behavior of reinforced concrete beams exposed to harsh environmental conditions, such as high humidity and coastal areas, which accelerate corrosion. This issue poses a significant threat to structural safety, as corrosion leads to the loss of a substantial portion of the design reinforcement area, reducing load-bearing capacity and increasing the likelihood of structural failure.

Using numerical analysis through the ABAQUS software, the study evaluates the impact of varying degrees of corrosion on load capacity and final deflection. Three digital models of reinforced concrete beams with different corrosion levels were developed, simulating reinforcement diameter reduction, with steel loss ranging from 20% to 25%. The analysis under different loading conditions revealed a significant reduction in load-bearing capacity and an increase in final deflection due to corrosion, indicating weakened structural performance.

The study highlights the importance of advanced numerical tools like ABAQUS in assessing the impact of corrosion. It recommends adopting proactive maintenance strategies, including corrosion-resistant techniques such as cathodic protection, and revising design standards to consider the long-term effects of corrosion on reinforced concrete structures.

**Keywords:** Corrosion, Reinforcement, Deflection, Numerical Analysis, ABAQUS, FE Modeling

## مقدمة

تُعدّ ظاهرة التآكل من الظواهر المهمة التي تؤثر بشكل كبير على سلامة وأداء الهياكل الخرسانية المسلحة. تعتبر عملية التآكل تفاعلاً كيميائياً وميكانيكياً يحدث عندما يتعرض حديد التسليح في الخرسانة لعوامل بيئية قد تؤدي إلى تدهوره مع مرور الوقت. التآكل ليس فقط يسبب فقداناً تدريجياً في قوة ومتانة المواد، بل يؤثر أيضاً على الاستقرار الهيكلي للمنشآت. إن تأثير التآكل يتعاظم في البيئات الرطبة والمالحة، حيث تساهم الأملاح والرطوبة في تسريع العملية، مما يؤدي إلى حدوث تصدعات وتآكل في الخرسانة وحديد التسليح على حد سواء.

تشير الدراسات إلى أن التآكل يحدث ببطء وقد لا يكون واضحاً في المراحل الأولى، ولكن مع مرور الوقت، يمكن أن يتسبب في تدهور كبير في الخصائص الميكانيكية للخرسانة، مما يتطلب تدخلاً للصيانة المكلفة والمعقدة. إن عدم معالجة التآكل في الوقت المناسب قد يؤدي إلى الحاجة إلى استثمارات باهظة لإعادة تأهيل المنشآت، فضلاً عن المخاطر المحتملة على السلامة العامة وسلامة المستخدمين. الهدف من هذه الدراسة هو تحليل تأثير تآكل حديد التسليح على الأداء الإنشائي للكمرات الخرسانية المسلحة في الظروف البيئية القاسية. سيتم تحقيق هذا الهدف من خلال استخدام التحليل العددي باستخدام برنامج ABAQUS، والذي سيمكننا من تقييم تأثير مستويات متنوعة من التآكل على قدرة تحمل الكمرات وتشوهها النهائي. تسعى الدراسة إلى تقديم رؤى قيمة تساعد في تحسين استراتيجيات التصميم والصيانة، لضمان استمرار سلامة الهياكل الخرسانية على مدى الزمن. في هذا السياق، حصلت ظاهرة تآكل حديد التسليح على اهتمام كبير من الباحثين والممارسين في مجال الهندسة المدنية. فقد تناولت الدراسات العديدة الآليات التي تساهم في تسريع التآكل، وطرق التقييم والاختبار، واستراتيجيات الحماية المختلفة. على سبيل المثال، أظهرت دراسة لـ [1] (Smith et al., 2018) كيف تؤثر البيئة الساحلية، بما في ذلك الأملاح والرطوبة، على معدل تآكل حديد التسليح، وطرحت استراتيجيات مختلفة للتعامل مع هذه التحديات. من ناحية أخرى، قدمت دراسة أخرى لـ [2] (Johnson & Lee, 2019) تحليلاً مفصلاً لتأثير التآكل على السلوك الإنشائي للكمرات الخرسانية باستخدام تجارب معملية ونماذج عددية، مما ساهم في فهم كيف يمكن أن يؤثر التآكل على الأداء الإنشائي للعناصر المختلفة في المنشآت. علاوة على ذلك، تركز الأبحاث الحديثة على تقنيات إعادة تأهيل الهياكل المتضررة، مثل استخدام الألياف الكربونية لتعزيز الكمرات وإصلاح الأجزاء المتآكلة بمواد حديثة، كما أظهرتها دراسة لـ [3] (Miller et al., 2020)، هذه الأبحاث أظهرت أيضاً فاعلية كبيرة في استخدام هذه التقنيات في تحسين الأداء الإنشائي وتقليل تكاليف الصيانة. وفي مجال التحليل العددي واستخدام نظرية العناصر المتناهية، قدمت الأبحاث التي أجراها [4] (Garcia & Perez, 2021) نموذجاً رقمياً لتأثير التآكل باستخدام برنامج ABAQUS، مما يعكس أهمية المحاكاة العددية في توقع نسب الفاقد بدقة وتكلفة أقل مقارنة بالتجارب المعملية التقليدية. في زيارة ميدانية أجراها فريق العمل بالأكاديمية الليبية تحت إشراف د. بشير صالح لملاعب طرابلس الدولي قبل عملية الصيانة، لوحظت ظاهرة التآكل بوضوح في الكمرات، حيث تم تسجيل انهيار وتشقق في الغطاء الخرساني وصدأ متزايد في بعض المناطق. يوضح الشكل 1. كمرات تأكلت أطرافها نتيجة عوامل بيئية متعددة، بينما يوضح الشكل 2 كمرات أخرى

تعرضت لتشوّه نتيجة فقدان جزء من مقطع حديد التسليح. كما أظهرت دراسة لـ [5] (Chung et al., 2021) تأثير التآكل على الأداء الميكانيكي للأعمدة الخرسانية، موضحة كيف يمكن أن يؤدي التآكل إلى تقليل قدرة التحمل القصوى للعناصر الإنشائية. بالإضافة إلى ذلك، دراسة (Ahmed & Khan, 2022) [6] تناولت استراتيجيات الصيانة المتقدمة التي يمكن تطبيقها للحد من تأثير التآكل وتحسين العمر الافتراضي للهياكل الخرسانية. فيما يخص التطبيقات العملية، قدّمت دراسة [7] (Lee & Wong, 2022) نماذج تجريبية لتحليل تأثير التآكل على الجسور الخرسانية واختبار فعالية المواد البديلة في تعزيز قوة التحمل الإنشائي. كما تناولت دراسة [8] (Patel & Sharma, 2023) استخدام الألياف الزجاجية كبديل لحديد التسليح التقليدي في بعض التطبيقات الخاصة.



شكل 1.. كمرة بطول 5 متر تعرضت لانهيار الغطاء الخرساني وفقد جزء من مساحة مقطع حديد التسليح (المصدر المؤلفين)



شكل 2. كمرة تعرضت لتشوّه من ناتج فقدان جزء من مقطع حديد التسليح في منطقة القص (المصدر المؤلفين)

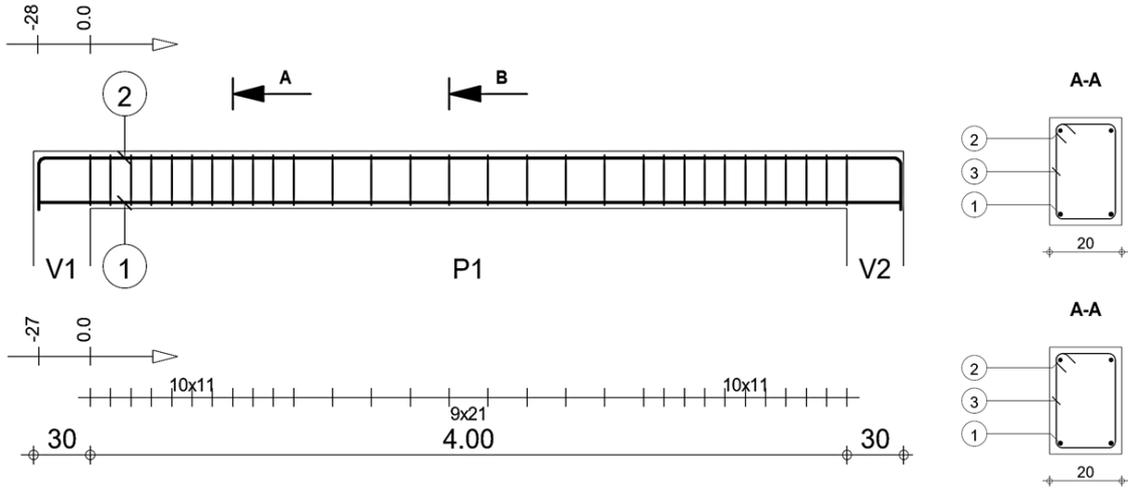
نسعى في هذه الدراسة إلى التركيز على تأثير تآكل حديد التسليح وانهايار الغطاء الخرساني على الأداء الإنشائي للهياكل الخرسانية، وكيف يمكن أن يؤدي ذلك إلى فقدان السلامة الهيكلية. تتضمن الدراسة التحقق العددي باستخدام نظرية العناصر المتناهية وبرمجية الـ ABAQUS لتقييم تأثير استبدال حديد التسليح المتضرر على السلوك الإنشائي. تهدف الدراسة إلى تحليل السلوك الإنشائي في مناطق مختلفة على طول الكمرات حيث تتجاوز نسبة الفاقد فيها 20% و25% من مساحة الحديد التصميمية، وتحديد المسافة الفعالة في مناطق القص والانحناء وتقدير سعة التحميل المتبقية. تشمل الدراسة التحقق العددي الشامل من خلال تمثيل كمرات مختلفة وتقديم دراسة علمية حول عملية احتواء هذه الكمرات، وتقديم مقترحات علمية لأساليب الصيانة كبديل للصيانة التقليدية المعمول بها في الوقت الحالي.

### النموذج الرياضي (FEM) لتحليل تآكل الكمرات الخرسانية

#### 1.1 التحليل الإنشائي والتصميم للكمرة الخرسانية تحت ظروف التآكل

تستند منهجية هذه الورقة البحثية إلى دراسة شاملة حول الكمرات الخرسانية المتآكلة، بهدف فهم أسباب التآكل ومدى تأثيره على حديد التسليح [8]. يتم ذلك من خلال إعداد ثلاث كمرات خرسانية بسيطة الإسناد، يختلف كل منها عن الآخر في مقدار تآكل قطر حديد التسليح في مناطق مختلفة من الكمرة، مع التركيز في هذا البحث على مناطق القص. سيتم التركيز على المناطق التي يتجاوز فيها نسبة الفاقد أكثر من 20% من مساحة الحديد التصميمية. تهدف الدراسة إلى معرفة كيفية تصرف الكمرات عند فقدان مساحة من حديد التسليح بسبب العوامل البيئية المختلفة، وتحديد إمكانية ترميمها. كما تهدف إلى استخدام تطبيقات العناصر المتناهية (ABAQUS) كبديل للاختبارات التجريبية [9]. نسعى من خلال هذه الدراسة إلى الحصول على نتائج تساعد في تجاوز المخاطر التي قد تنجم عن التشوهات التي تحدث للعناصر الإنشائية التي تعرضت لفقدان جزء من مساحة حديد التسليح التصميمية. في هذا التحليل، تم استخدام تطبيقات العناصر المتناهية ABAQUS، حيث تم نمذجة الكمرة باستخدام حديد تسليح علوي (2Ø12mm) وحديد تسليح سفلي (2Ø14mm)، مع مقطع خرساني بأبعاد 400×300×20 مم. تم اختبار العينات بمواصفات خرسانية مسلحة وفقاً للشكل 3. والجدول 1.

تم تصميم الكمرات التي سيتم نمذجتها لمحاكاة الكمرات المتضررة في ملعب طرابلس الدولي مع تقليص المقطع والطول بنفس النسبة لنتمكن من انجاز التحليل العددي في زمن قياسي، حيث من المعلوم ان مدة التحليل باستخدام تطبيقات النظرية المتناهية يأخذ وقت يتجاوز الاسابيع احيانا. تم إعداد نموذج مثالي لكمرة بسيطة الإسناد لتحاكي كمرة تعرضت لتآكل في قطر حديد التسليح في مناطق مختلفة منها. الشكل 3 يوضح النموذج القياسي للكمرة. تم استخدام برنامج Robot Structural Analysis Professional 2024 في تحليل وتصميم الكمرة. أحمال الخدمة التي وضعت على الكمرة هي أحمال تقليدية (حية وميتة). أظهرت نتائج التحليل قوة عزوم مقدارها 18.97 kNm وقوة قص عند المساند مقدارها 18.97 kN، أما التشوه فكان 6.54 mm، مساحة حديد التسليح في أماكن الضغط والشد موضحة في الجدول 1 الذي يبين ايضا خواص الكمرة والأبعاد والتفاصيل الإنشائية. [10]



شكل 3 يوضح مقطع طولي في الكمرة B1 موضح فيها حديد التسليح وابعاد المقاطع والتسليح (المصدر: المؤلفين)

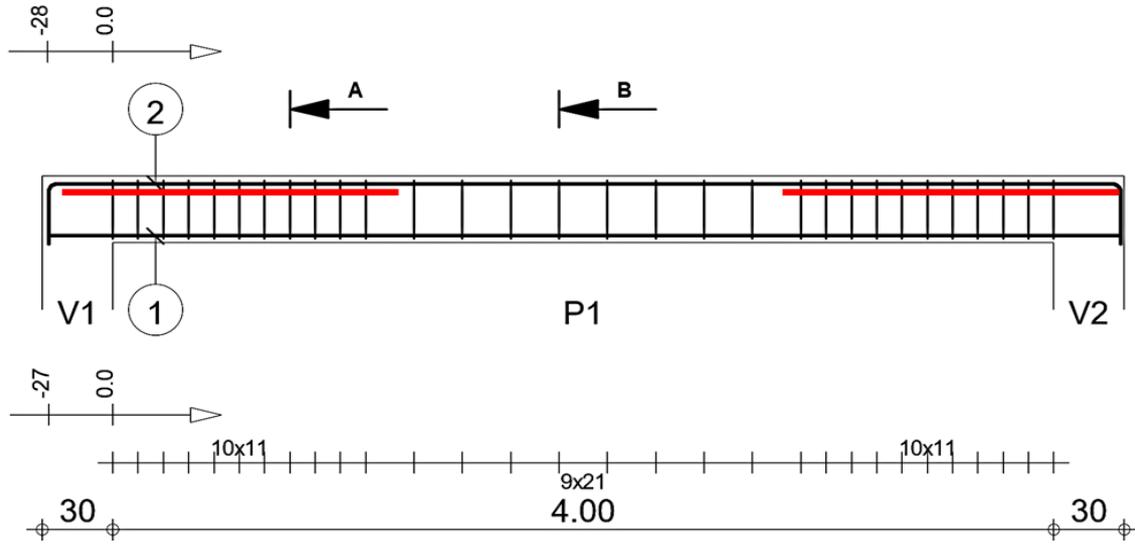
#### جدول 1. يوضح تفاصيل مقطع الكمرة B1 وخواص المواد وبعض التفاصيل الإنشائية

NO	MATERIAL PROPERTIES	SPECIFICATION	GEOMETRY	SPECIFICATION
1	Concrete	(MPa) C25/30 $f_{ck}$	Span length	.00 (M)4
2	Density	2447.32 (kG/m <sup>3</sup> )	from Section	0.0 (CM)3.0 X 20
3	Aggregate size	20.0 (mm)	L supp	0.20
4	Longitudinal reinforcement:	0.00 MPa45 $f_{yk} =$	L	00.4
5	Transversal reinforcement:	0MPa450 $f_{yk}=45B$	R supp (m)	0.20

#### 1.2 محاكاة تآكل الكمرات وتأثيره على الأداء الهيكلي

تستهدف هذه الدراسة محاكاة تأثير التآكل الذي يحدث في مناطق القص بالكمرات الخرسانية، والذي يؤدي إلى فقدان مساحة من حديد التسليح، مما قد يتسبب في انهيار الكمرة وبالتالي انهيار المنشأ بأسره. كما تهدف إلى تقادي عمليات الصيانة العشوائية وغير المنهجية عبر تقييم الأداء النسبي للكمرات وتحديد شكل الصيانة الأمثل، بما في ذلك عمليات الإزالة، استناداً إلى تحليل علمي مدروس لحالة الكمرات بعد تعرضها للتآكل. تم استخدام تطبيقات العناصر المنتهية (Finite Element Analysis) لإجراء محاكاة شاملة للهياكل المدروسة، وذلك لتحديد سلوك الكمرة نتيجة فقدان جزء من مساحة مقاطع حديد التسليح. يشمل ذلك نمذجة أقطار حديد التسليح بقطر تدريجي، لمحاكاة التآكل الناتج من الصدأ، مع تقليل نسبة قوة التماسك بين الخرسانة وحديد التسليح، وهو ما يعكس تأثير التآكل على الخصائص الميكانيكية للخرسانة والحديد. يتم تحليل العلاقة بين قوة الكمرة والتشوهات (Force-Displacement) في مناطق القص والتشوهات المركزية (deformation) من خلال بيانات المحاكاة التي تعكس استجابة الكمرة للتآكل. تم اختيار ثلاث نماذج عددية لكمرات متشابهة في المقطع ولكن مختلفة في حديد التسليح. الكمرة القياسية B1-0 ذات مقطع

200 مم × 300 مم × 4000 مم، تم تسليحها بالكامل وفقاً للتصميم الموضح في الشكل. 4، أما الكمرات B1-1 فقد تم تقليص قطر حديد التسليح من 12 مم إلى 10 مم في الاطراف (مناطق القص) وبطول 1.0 م، لمحاكاة التآكل الناتج عن عوامل التعرية والصدأ، مما يقلل من قدرة التحمل ويزيد من التوزيع غير المتجانس للإجهادات. الكمرات B1-2 شهدت تقليصاً في قطر حديد التسليح إلى 8 مم في مناطق القص على بعد 1 متر من العمود، لمحاكاة فقدان قطر حديد التسليح نتيجة الصدأ. شكل 4 يوضح اماكن الفاقد في حديد التسليح لجزء من السماكة (مساحة المقطع).



شكل. 4. يوضح اماكن حديد التسليح الفاقد لجزء من السماكة (مساحة المقطع)، (المصدر: المؤلفين)

## تحليل سلوك الكمرات باستخدام العناصر المتناهية (FEM)

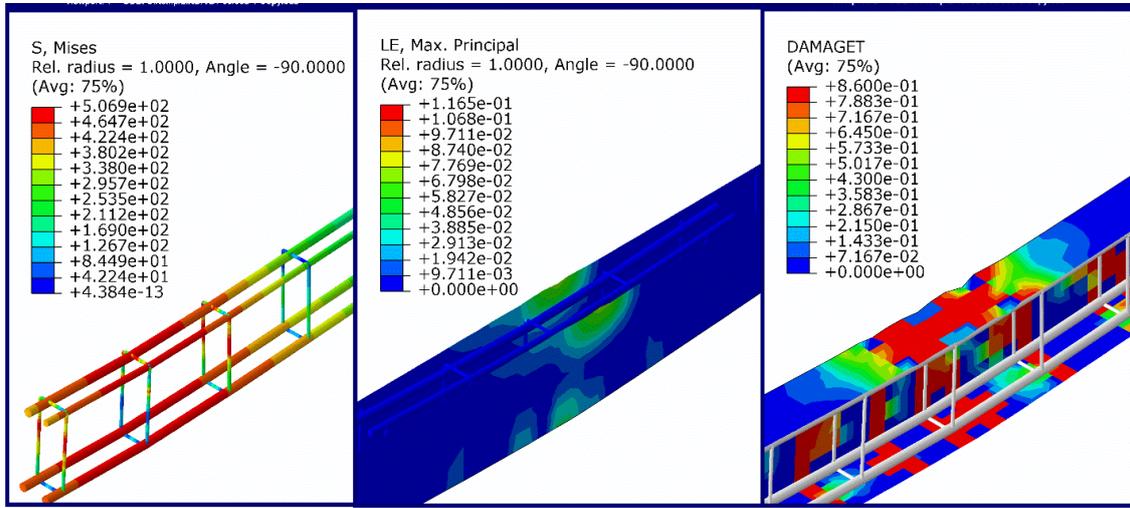
### 1.1 التحليل الاستاتيكي (Static Analysis) لتحديد تأثيرات التآكل

في هذا البحث، تم استخدام التحليل الاستاتيكي (Static Analysis) لتحديد تأثيرات التآكل (corrosion) على أداء الكمرات. تم أخذ قراءات دقيقة في نقاط محددة على الكمرات لتحديد العلاقة بين القوة المطبقة (applied force) والإزاحة (displacement) حتى الوصول إلى مرحلة الفشل (failure)، مما يوفر بيانات حول استجابة الكمرات تحت الأحمال المختلفة. تمت المقارنة بين الكمرات B1-0 القياسية والكمرات B1-1 و B1-2 من حيث العلاقة بين القوة والتشوه (deformation) في وسط الكمرات، مما يساهم في فهم كيفية تأثير التآكل على السلوك الديناميكي (dynamic behavior) للكمرات.

تضمنت الدراسة مقارنة التشوهات (deformations) التي تحدث للكمرات خلال مراحل التحميل حتى نقطة الفشل، مما يعكس سلوك الكمرات في مرحلتها المرنة (elasticity) واللدونة (plasticity). الشكل 5 يوضح الفروقات في

التشوه بين النماذج المختلفة. بالإضافة إلى ذلك، تم رصد التشققات الشعيرية (hairline cracks) التي تظهر على الكمرات أثناء التحميل، وتحليل الإجهادات (stresses) والانفعالات (strains) والإزاحات (displacements) ووردود الأفعال (reactions)، مما يوفر رؤى حول الأداء الهيكلي (structural performance) تحت ظروف التآكل.

تعتبر هذه النتائج ضرورية لتطوير استراتيجيات صيانة فعالة وتحسين تصميم الكمرات لمواجهة التآكل، مما يساهم في زيادة أمان المنشآت وتحسين متانتها على المدى الطويل.

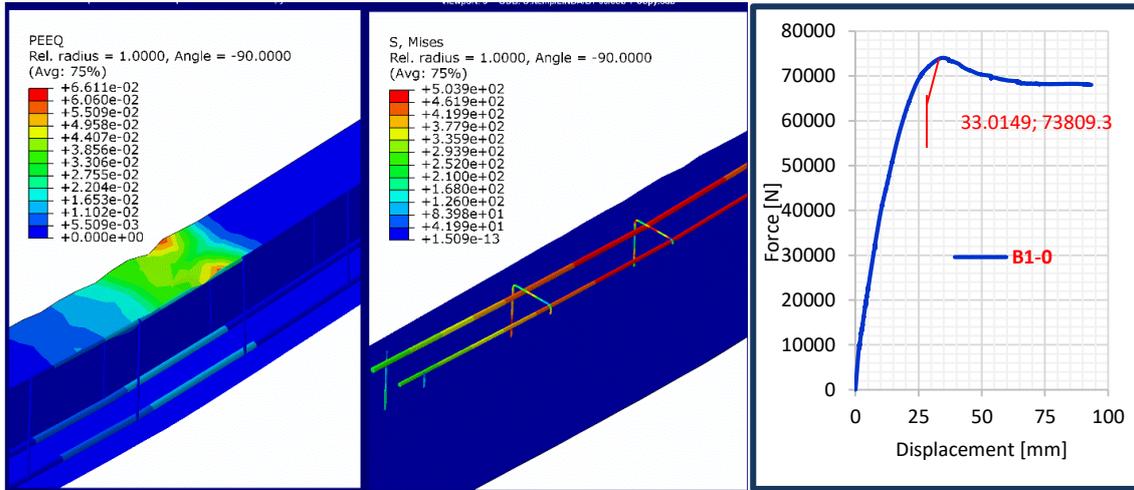


شكل 5 يوضح تأثير الكمرات وتفصيل حديد التسليح من ناتج الاجهاد والتشوه والانهياب التدريجي باستخدام FEM

1.2 تحليل سلوك الكمرات (**Beam Behavior Analysis**) تحت تأثير فقدان حديد التسليح لتجنب التأثيرات الديناميكية (dynamic effects) أثناء التجربة، تم تحميل الكمرات ببطء، وتم استخدام نفس معدل التحميل (loading rate) في عمليات المحاكاة العددية [11] (numerical simulations)، 12. [تم مراقبة سير التحليل باستخدام خاصية "Job Monitor" من خلال ميزات البرمجية ABAQUS/CAD [6] لضمان توافق علاقات القوة والإزاحة (force-displacement relations)، وهو ما يُعد مؤشرًا رئيسيًا على ملاءمة نهج نمذجة العناصر المحدودة (finite element modeling) المستخدم. [13, 14] فيما يتعلق بالسلوك العام، أظهرت العينات الخرسانية المركبة (composite samples) وحديد التسليح (reinforcement) استجابة ملحوظة لتشوهات كبيرة (significant deformations) في مناطق مختلفة من الكمرات، مع تركيز أكبر في المناطق المحيطة بالمساند (supports) ووسط الكمرات (mid-span) منطقة التشوه القصوى (maximum deflection area). ترتبط هذه الظاهرة عادةً بالتشقق البطيء (slow cracking) في المناطق الأضعف من الكمرات، مثل الأجزاء الطرفية القريبة من العمود (column) والتي تعاني من إجهاد شديد (high stress)، مما يؤدي إلى تمزق تدريجي للحديد التسليح (progressive reinforcement rupture) وتشقق الخرسانة. (cracking of concrete) هذا يشير إلى أهمية

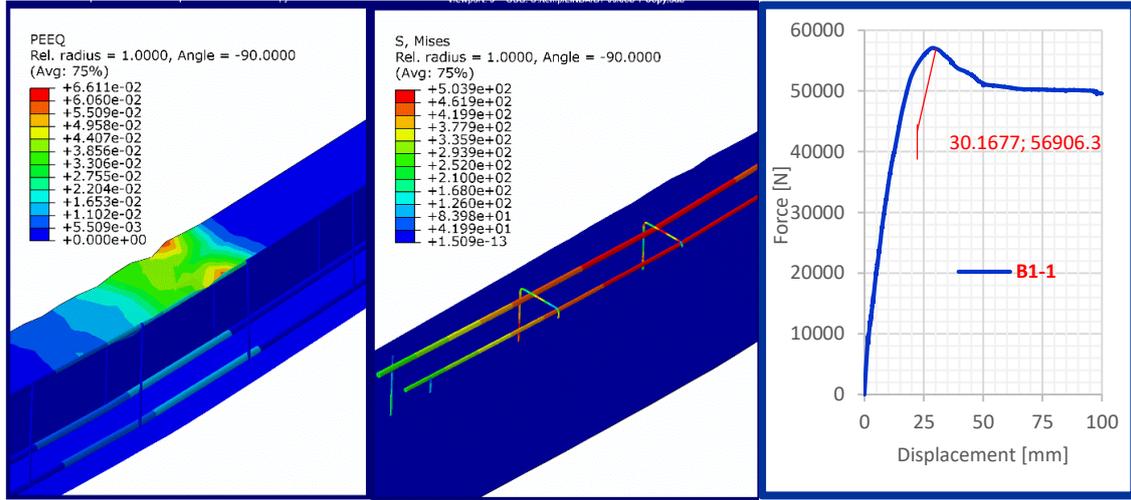
تحديد المناطق الأكثر عرضة للتشقق المبكر (early cracking) لتطبيق استراتيجيات صيانة ووقاية فعالة (effective maintenance and prevention strategies)، في نموذج الكمرات B1-0، تم تثبيت الكمرات ذات الإسناد البسيط (simply supported beam) وخضعت لإزاحة رأسية مقدارها 100 مم لتقييم سلوك الكمرات وقوتها من خلال العلاقة بين القوة والإزاحة (Force-Displacement).

تم اختيار هذه العلاقة لتكون معيارًا يُقاس عليه باقي الكمرات في الدراسة. يوضح الشكل 6 تفاصيل التشوه الخارجي والداخلي (external and internal deformations) وتأثيره من ناتج الأحمال (load effects) وأيضًا مقارنة بين الأحمال والتشوه للكمرات B1-0. تُظهر النتائج أن التحميل البطيء يسمح بمحاكاة دقيقة لسلوك الكمرات تحت الأحمال، ويؤكد أهمية ضبط معاملات المحاكاة (simulation parameters) لضمان الحصول على نتائج تمثيلية (representative results) كما أن التحليل الدقيق لمناطق التشوه (detailed deformation analysis) يساهم في تحسين فهمنا للتفاعل بين الخرسانة وحديد التسليح (interaction between concrete and reinforcement)، مما يعزز قدرتنا على تصميم هياكل أكثر أمانًا وكفاءة (safer and more efficient structures).



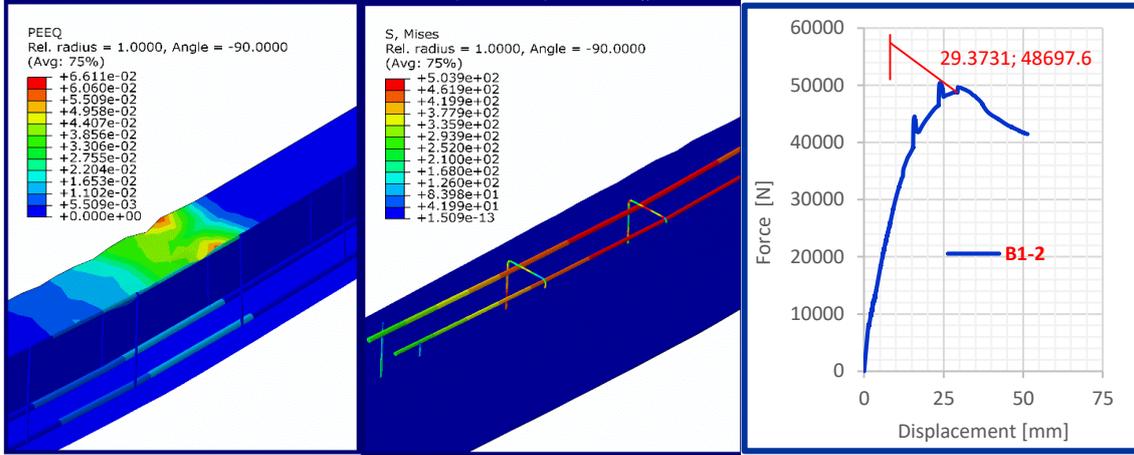
شكل 6 تفاصيل التشوه الخارجي والداخلي وتأثيره من ناتج الأحمال وإيضاً مقارنة بين الأحمال والتشوه للكمرات B1-0. أما الكمرات B1-1، فقد تم تقليص مقطع حديد التسليح فيها من قطر 12 مم إلى قطر 10 مم لمحاكاة الكمرات التي تعرضت لفقدان مساحة من التسليح نتيجة الظروف البيئية المذكورة. هذا التقليص يهدف إلى محاكاة تأثير التآكل الذي يحدث في الكمرات الواقعة في بيئات ذات رطوبة عالية أو بالقرب من البحر، حيث يساهم التآكل في تقليل فعالية التسليح وبالتالي يؤثر على أداء الكمرات. وقد قورنت النتائج المتحصل عليها من العلاقة بين القوة والتشوه بالنموذج القياسي B1-0، مما يسمح بتقييم كيفية تأثير تقليص مقطع حديد التسليح على القدرة التحملية (load-bearing capacity) وسلوك الكمرات تحت الأحمال. الشكل 7 يوضح تفاصيل التشوه الخارجي والداخلي وتأثيره من

نتائج الأحمال وأيضاً مقارنة بين الأحمال والتشوه للكمرات B1-0. هذا الشكل يعرض كيف يؤثر التصميم الأساسي للنموذج القياسي على توزيع الأحمال والتشوهات، مما يوفر قاعدة مرجعية لفهم تأثير التعديلات على الأداء الهيكلي.

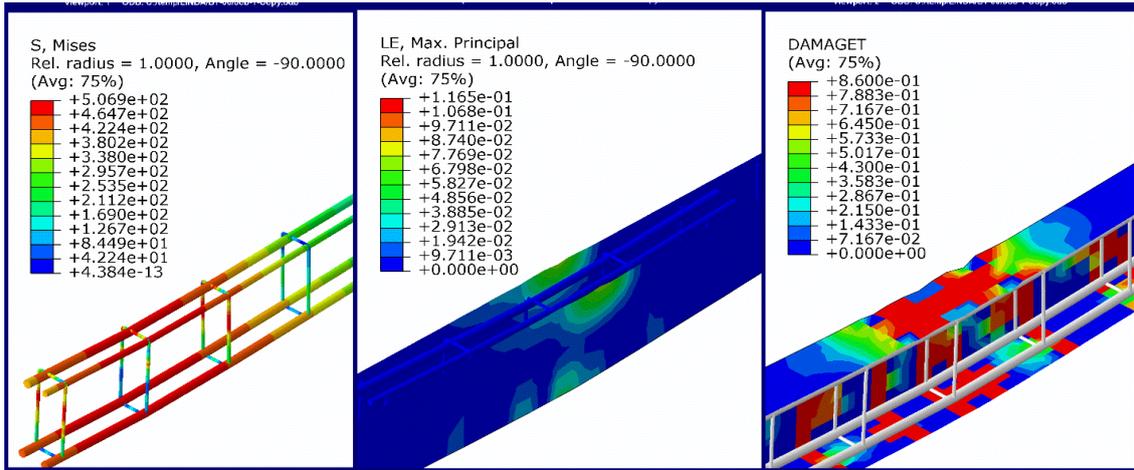


شكل 7 تفاصيل التشوه الخارجي والداخلي وتأثيره من نتائج الأحمال وأيضاً مقارنة بين الأحمال والتشوه للكمرات B1-1.

فيما يوضح الشكل 8 تفاصيل التشوه الناتج من الأحمال على الكمرات B1-1، ويعرض مقارنة العلاقة بين الأحمال والتشوه للكمرات B1-1. هذا الشكل يبرز التأثير الواضح لتقليل مقطع حديد التسليح على تشوه الكمرات وقوة تحملها، مما يعزز الفهم حول كيفية تدهور الأداء الهيكلي نتيجة نقص التسليح. أخيراً، يوضح الشكل 9 تفاصيل التشوه ومقارنة القوة بالإزاحة للكمرات B1-2، حيث تم تقليل مقطع حديد التسليح إلى أبعد من ذلك حوالي 8 مم في منطقة القص، وهي الحالة الأكثر سوءاً التي قد تتعرض لها الكمرات قبل حدوث التشوه الكامل والانهايار. تعتبر هذه المقارنات ضرورية لتحديد ما إذا كانت الكمرات التي تعرضت لفقدان جزء من حديد التسليح يمكنها تحمل الأحمال المخصصة لها، أم أنه يجب استبدالها بالكامل. يقدم هذا الشكل رؤية شاملة للتأثيرات المتزايدة لتقليل التسليح على الأداء الهيكلي، ويعزز من أهمية التصحيح المبكر والتخطيط الدقيق للتصميمات والصيانة لضمان استدامة السلامة الهيكلية. التفاصيل المقدمة في هذه الأشكال تساهم في تحسين فهمنا للآثار المختلفة لتقليل التسليح على الكمرات وتساعد في تطوير استراتيجيات تصميم وصيانة فعالة للحفاظ على الأداء الهيكلي في ظروف بيئية قاسية.



شكل 8 تفاصيل التشوه الخارجي والداخلي وتأثيره من نتائج الاحمال وايضا مقارنة بين الاحمال والتشوه للكمره B1-2



شكل 9 تفاصيل التشوه الخارجي والداخلي وتأثيره من نتائج الاحمال وايضا مقارنة بين الاحمال والتشوه للكمره B1-0

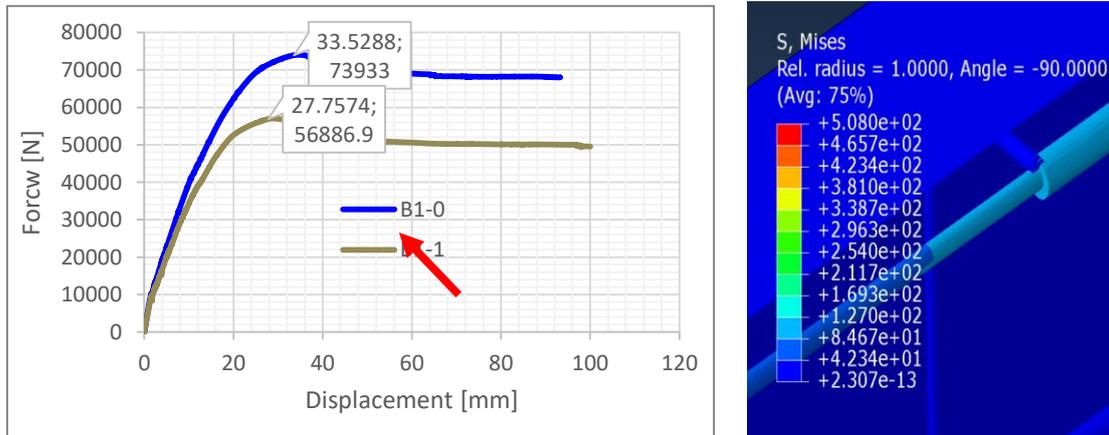
### مناقشة النتائج (Discussion of Results)

تُظهر النتائج أن الإزاحة المطبقة على الكمره تُنتج رد فعل يعادل قدرة تحمل الكمره وفقاً لمواصفات التسليح القياسية والنسبة المفقودة في كل كمره. مع زيادة الأحمال المطبقة، تستمر الكمره في التشوه حتى تصل إلى نقطة التدهور النهائي، حيث تبدأ في الفشل الواضح والتشقق، متبوعة بمسار توازن غير مستقر بعد بلوغ الحد الأقصى لقدرتها على التحمل. يُستخدم مقدار الحمل النهائي لتقدير المرونة الإنشائية وهامش الأمان الذي قد يتوفر للهيكل تحت ظروف التحميل القصوى. تُعد هذه البيانات ضرورية لأنها تساعد في فهم مدى قدرة الهياكل على تحمل الأحمال الكبيرة قبل الوصول إلى حالة الفشل.

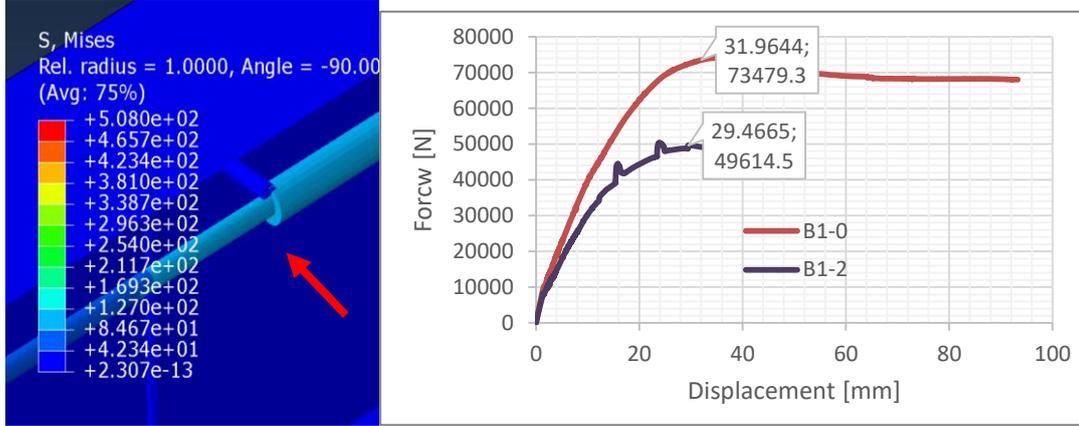
بالنسبة للكمرة النموذجية B1-0 ، سجلت العلاقة بين القوة والتشوه (الإزاحة) قيمة قدرها 73.93 كيلو نيوتن عند تشوه قدره 33.52 مم. في المقابل، كانت القوة تساوي 56.88 كيلو نيوتن عند تشوه قدره 27.75 مم في الكمرة B1-1. يظهر هذا التناقص الكبير في قدرة الكمرة نتيجة لفقدان سماكة حديد التسليح، مما أدى إلى ضعف الترابط بين الحديد والخرسانة، وبالتالي تقليل قدرة الكمرة على تحمل الأحمال. تشير هذه النتائج إلى أهمية الحفاظ على سماكة الحديد المناسبة وإجراء الصيانة الدورية لتفادي التآكل الذي يمكن أن يؤدي إلى تدهور الأداء الهيكلي للكمرة. يجب أخذ هذا التناقص الكبير في الاعتبار عند تنفيذ الصيانة الضرورية للمنشأ. عند النظر في موقع المبنى بالقرب من البحر، يتضح أن التآكل الناجم عن الرطوبة العالية والملوحة المحيطية يساهم في تسريع تدهور حديد التسليح. هذا التأثير البيئي يجعل من الضروري تعزيز استراتيجيات الصيانة والتصميم للتعامل مع ظروف التآكل المتسارعة، خاصة في البيئات الساحلية. يشير ذلك إلى أن فقدان سماكة حديد التسليح قد يكون أكثر حدة في المباني القريبة من البحر، مما يبرز الحاجة إلى تصميم هياكل مقاومة للتآكل في هذه المواقع.

يوضح الشكل 9 العلاقة بين القوة والتشوه للكمرتين B1-0 و B1-1، حيث يتضح تأثير فقدان مساحة حديد التسليح على الأداء الإنشائي للكمرات. يظهر الشكل أن الكمرات التي فقدت مساحات كبيرة من التسليح تُظهر ضعفًا ملحوظًا في تحمل الأحمال مقارنةً بالكمرات التي فقدت مساحات أقل من التسليح. كما يوضح الشكل أيضًا تأثير تقليل سماكة حديد التسليح من #12 إلى #10 مم على الأداء الهيكلي.

أما بالنسبة للكمرة النموذجية B1-2، فكانت النتائج أضعف بالمقارنة بالحالة القياسية (B1-0). يوضح الشكل 11 العلاقة بين القوة والإزاحة للكمرة، كما يبين التشوه في الكمرة أيضًا. تساهم هذه البيانات في توضيح مدى تأثير الفاقد في مساحة التسليح على سلوك الكمرة تحت الأحمال. الكمرة B1-2 أظهرت أداءً أقل كفاءة، مما يدل على أن فقدان مساحة حديد التسليح يؤثر بشكل كبير على قدرة التحميل والتشوه النهائي للكمرة.

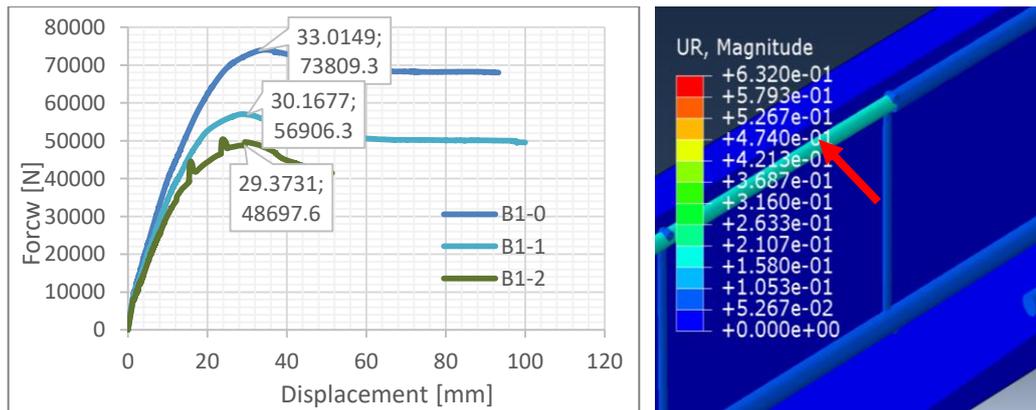


شكل 10 يوضح العلاقة ما بين قوة وتشوه الكمرات B1-0، B1-1 من ناتج فقدان مساحة حديد التسليح



شكل 11 يوضح العلاقة ما بين قوة وتشوه الكمرات B1-0، B1-2 من ناتج فقدان لمساحة حديد التسليح

الشكل 5 يوضح المقارنة بين جميع نماذج الكمرات (B1-0, B1-1, B1-2) ، وبين العلاقة بين الإزاحة والقوة (Force-Displacement)، مما يقدم تصويراً مرئياً للسلوك المرصود داخل الكمرات. هذا الشكل يساعد في تقديم نظرة شاملة عن كيفية تأثير فقدان مساحة التسليح على سلوك الكمرة. عند مقارنة النتائج (القوة أو التشوه) يتضح تأثير فقدان مساحة مقطع حديد التسليح على قوة ومتانة الكمرات، حيث تتأثر الكمرات بهذا النقص وينعكس بشكل سلبي على ديمومة استخدامها، مما يؤكد على ضرورة المعالجة لتجنب فقدان المنشأ بالكامل. هذه المقارنة تسلط الضوء على أهمية العناية بالتسليح والصيانة المستمرة للهياكل لضمان ديمومتها وأدائها الفعال.



شكل 12 . يوضح تفاصيل التشوه الخارجي والداخلي وتأثير الأحمال على الكمرة B1-0 ، بينما يوضح الشكل 8 تفاصيل التشوه والعلاقة بين الأحمال والإزاحة للكمرة B1-1. تمثل النتائج فرقاً ملحوظاً في الأداء الهيكلي، (تقليص التسليح إلى زيادة التشوه وتقليل القدرة على تحمل الأحمال)

### الخلاصة (Conclusion)

توضح الدراسة أن الإزاحة المطبقة على الكمرات (beams) تولد رد فعل يعادل قدرتها على التحمل (load-bearing capacity) وفقاً للتسليح القياسي (standard reinforcement) والنسبة المفقودة. مع زيادة الأحمال (loads)، تستمر الكمرات في التشوه (deflection) حتى تصل إلى نقطة الفشل النهائي (ultimate failure point)، حيث تبدأ في التشقق (cracking) والفشل الواضح، متبوعة بمسار توازن غير مستقر (unstable equilibrium) بعد بلوغ الحد الأقصى لقدرتها على التحمل (maximum load capacity). الكمرات النموذجية B1-0 سجلت علاقة بين القوة والتشوه (force-deflection relationship) بلغت 73.93 كيلو نيوتن عند تشوه قدره 33.52 مم، بينما كانت العلاقة في الكمرات B1-1 تساوي 56.88 كيلو نيوتن عند تشوه قدره 27.75 مم. هذا التناقص الكبير في القوة (strength) ناتج عن فقدان سماكة حديد التسليح (loss of reinforcement thickness)، مما أدى إلى ضعف الترابط بين الحديد والخرسانة (concrete) وتقليل قدرة الكمرات على تحمل الأحمال. الكمرات النموذجية B1-2 أظهرت نتائج أضعف مقارنة بالحالة القياسية، مما يدل على أن فقدان مساحة حديد التسليح (loss of reinforcement area) يؤثر بشكل كبير على القدرة التحملية (load-bearing capacity) والتشوه النهائي للكمرات.

تم استخدام برنامج ABAQUS لتطبيق نظرية العناصر المنتهية (Finite Element Theory) في تحليل سلوك الكمرات تحت الأحمال المختلفة. ساعدت هذه التقنية في محاكاة التشوهات (deformations) والتشققات (crack formations) وتقدير المرونة الإنشائية (structural flexibility) بدقة عالية. أظهرت نتائج النماذج المستندة إلى ABAQUS توافقاً مع النتائج التجريبية، مما يؤكد فعالية هذه الأدوات في تقييم الأداء الإنشائي (structural performance) للكمرات.

استناداً إلى نتائج الدراسة، تُبرز التوصيات التالية أهمية تحسين استراتيجيات الصيانة والتصميم وأهمية استخدام الأدوات المتقدمة في تقييم الأداء الإنشائي وتؤكد ضرورة اتخاذ إجراءات تصحيحية مدروسة لضمان سلامة واستدامة الهياكل الخرسانية على المدى الطويل وتتلخص التوصيات وفقاً للآتي:

1. تقييم دقيق باستخدام ABAQUS: فمن الضروري إجراء تقييم شامل ودقيق للكمرات باستخدام أدوات التحليل العددي قبل بدء الصيانة. يتيح هذا التقييم تحديد حالة الكمرات بدقة وتوجيه الصيانة بشكل مناسب لضمان فعالية الإجراءات المتخذة.
2. تحسين استراتيجيات الصيانة وذلك إعادة تقييم استراتيجيات الصيانة الحالية، التي قد تكون عشوائية في بعض المنشآت الكبرى في ليبيا، وتنفيذ صيانة استباقية بناءً على نتائج التحليل العددي لتفادي التدهور الهيكلي (structural deterioration) وضمان سلامة الهيكل.

3. تعزيز مقاومة التآكل بتطوير وتطبيق تقنيات مقاومة التآكل مثل استخدام حديد تسليح مقاوم للتآكل أو تحسين الحماية الكاثودية (cathodic protection) ، خاصة في المنشآت الواقعة في المناطق الساحلية ذات الرطوبة العالية والملوحة.
4. تحديث معايير التصميم لتشمل تأثيرات التآكل المتسارع (accelerated corrosion effects) في البيئات القاسية، لضمان أن الهياكل يمكنها تحمل الأحمال الكبيرة دون مخاطر الفشل الهيكلي.

#### المصادر (References)

- Smith, J., Brown, A., & Wilson, C. (2018). Impact of Coastal Environments on Reinforcement Corrosion Rates. *Journal of Civil Engineering Research*, 45(2).
- Johnson, R., & Lee, S. (2019). Detailed Analysis of Corrosion Effects on Beam Behavior. *Structural Engineering Review*, 38(4), 567-584.
- Miller, T., Zhang, L., & Thompson, G. (2020). Rehabilitation Techniques for Corroded Structures Using Carbon Fiber Reinforced Polymers. *Construction and Building Materials*, 112, 895-910.
- Garcia, M., & Perez, H. (2021). Numerical Modeling of Corrosion Effects Using ABAQUS. *Computational Mechanics Journal*, 52(3), 303-319.
- Chung, K., Lee, Y., & Kim, D. (2021). Mechanical Performance of Corroded Concrete Columns. *Journal of Structural Integrity*, 27(1), 45-59.
- Ahmed, M., & Khan, S. (2022). Advanced Maintenance Strategies for Mitigating Corrosion Impact. *Engineering Maintenance Journal*, 33(2), 78-92.
- Lee, J., & Wong, E. (2022). Experimental Models for Analyzing Corrosion Effects on Concrete Bridges. *Transportation Infrastructure Journal*, 50(5), 233-250.
- Patel, N., & Sharma, P. (2023). Use of Glass Fibers as Alternatives to Traditional Reinforcement in Special Applications. *Materials Science and Engineering*, 64(6).
- Gizejowski M.A., Kwasniewski L., Salah W., Barcewicz W. (2008) Robustness oriented analysis of structural joints of steel-concrete composite frames, Robustness of Structures COST Action TU0601, 1st Workshop, 2nd MC Meeting and 1st WG Meetings, Proceedings of the 1st Workshop, Zurich, Switzerland, February 4-5, 2008, pp. 133-142
- Balcerzak, M., Kwasniewski L., Neves L.C., Gizejowski M. (2011) Numerical analysis of frame systems in case of progressive collapse, Robustness of Structures, Proceedings of the Final
- Dassault Systèmes SIMULIA 2011. ABAQUS Theory Manual, Version 6.10, ABAQUS User's Manual, Version 6.610.
- B. SALEH, "Moment-Rotation Characteristic of Joints of Steel-Concrete Composite Frame under Exceptional Events", IABSE Conference: Elegance in structures, pp 504-505, 13-15 May 2015, Nara, Japan, DOI: [10.2749/222137815815776050](https://doi.org/10.2749/222137815815776050).
- B. SALEH, Numerical Study of Four Bolts End-Plate Joint Behaviour for Robustness Assessment, International Conference on Civil Infrastructure and Construction,

CIC 2020, Vol. 132, pp 1016 -1023, 2020/2/2, Doha, Qatar, DOI  
<https://doi.org/10.29117/cic.2020.0132>.

Bashir Saleh \*, Sofian Bashir, Flexibility And Durability In End Plate Joints: Insights  
From Advanced Modeling And Simulation, Civil Engineering And Architecture  
Vol. 12(4), Pp. 3005 - 3012 , Doi: 10.13189/Cea.2024.120437,  
[https://www.hrpub.org/journals/article\\_info.php?aid=14352](https://www.hrpub.org/journals/article_info.php?aid=14352).