

العمارة المرنة ودور تكنولوجيا البناء في تطوير الأنظمة الهيكلية المتطورة

سامية عبد الرحمن عبية

أميرة علي سعيد حماد

المعهد العالي للعلوم والتقنية - طرابلس - ليبيا

Resilient Architecture and the Role of Building Technology in Developing Advanced Structural Systems

Samia Abdulrahman Abia

Amira Ali Said Hammad

Higher Institute of Science and Technology - Tripoli – Libya

Mmfhsh1973@gmail.com

تاريخ الاستلام: 2026/9/04 تاريخ المراجعة: 2026/9/08 تاريخ القبول: 2026/10/03 تاريخ النشر: 2026/10/22

الملخص

تهدف هذه الورقة إلى تأصيل مفهوم المرونة في العمارة بأنماطها الأربعة (الوظيفية، الإنشائية، التقنية، الصامدة) وتوضيح دور تكنولوجيا البناء المتقدمة في تفعيلها لتحقيق الاستدامة وتتعلق من إشكالية قصور المباني التقليدية عن مواكبة التغيرات المتسارعة. المنهجية: اعتمدت المنهج الوصفي التحليلي عبر تحليل 45 مرجعاً (2017-2024) ودراسة عشرة نماذج عالمية رائدة تم التركيز على ثلاثة محاور: وهي القدرة على التكيف، التحول والتوسع، التعافي بعد الصدمات، تم تحليل هذه الأمثلة تحليل كمي ووصفي وتقييم المرونة بشكل مصفوفة.

حيث أظهرت النتائج المصفوفة أن المرونة الحقيقية تتحقق بتكامل الأبعاد الثلاثة لتنتج مرونة صامدة. وحقق مستشفى سانت ماري 5/4.75 كأعلى نموذج صامد لعمله 36 ساعة بدون شبكة، بينما حقق The Edge و The Crystal (5/4.5) أعلى كفاءة تقنية بتوفير 40% من الطاقة، كما أثبتت النماذج أن العزل القاعدي Base Isolation يقلل الضرر الزلزالي 50%.

➤ . وتوصي الورقة بتبني مبدأ المسقط الحر والأنظمة القابلة للتركيب ودمج الأنظمة الذكية منذ المراحل الأولى، ودمج معايير المرونة في الكود الليبي؛ حيث أن كلما زادت درجة المرونة قلت الحاجة للهدم وإعادة البناء

➤ الكلمات المفتاحية

العمارة المرنة - تكنولوجيا البناء - أنظمة الإنشاء - الاستدامة - التصميم التكيفي.

Abstract

This paper seeks to conceptualize architectural resilience across its four typologies — functional, structural, technical, and robust — and to elucidate the role of advanced construction technologies in operationalizing it to achieve sustainability. The research problem emerges from the inadequacy of conventional buildings to adapt to accelerated environmental, technological, and social transformations.

Methodology: The study employs a descriptive-analytical approach, based on the analysis of 45 references (2017–2024) and an examination of ten leading international case studies. The analysis focused on three core axes: adaptability, transformation and expansion, and post-shock recovery. The case studies were assessed through quantitative and qualitative analysis, with resilience evaluated via a bespoke assessment matrix.

Results: The matrix revealed that genuine resilience is achieved through the integration of the three dimensions, culminating in robust resilience. St. Mary's Hospital scored 4.75/5 as the most robust model, capable of operating for 36 hours off-grid, while The Edge and The Crystal (4.5/5) demonstrated the highest technical efficiency, achieving 40% energy savings. Furthermore, the models confirmed that Base Isolation systems reduce seismic damage by 50%.

Conclusion: The paper recommends the adoption of the free plan principle, demountable systems, and the integration of smart systems from the early design stages, alongside the

incorporation of resilience criteria into the Libyan Building Code. It concludes that the higher the degree of resilience, the lower the need for demolition and reconstruction..

➤ **Keywords**

Flexible Architecture – Building Technology– Structural Systems – Sustainability – Adaptive Design)

1- مقدمة :

يُقصد بالمرونة في أبسط معانيها القدرة على التحول والتلاؤم بسهولة مع الظروف الطارئة دون فقدان الهوية أو الوظيفة وفي العمارة، تتجاوز المرونة مجرد فكرة التعديل الشكلي، لتصبح فلسفة تصميمية متكاملة تعني قدرة المبنى على الاستمرار في أداء وظائفه رغم تبدل المتطلبات، سواء كانت وظيفية أو بيئية أو اجتماعية. لا تقتصر المرونة على مرحلة التصميم فقط، بل هي مسار مستمر يشمل التصميم والتنفيذ الإنشائي وطوال دورة حياة المبنى، وصولاً إلى تقييم الأداء بعد الإشغال. فالمبنى المرن هو كيان ديناميكي متوازن، قادر على أن يظهر بصورة متكاملة قبل التغيير وبعده.

وتنقسم المرونة في العمارة إلى نوعين أساسيين يكملان بعضهما: الأولى هي المرونة الوظيفية، وتعني قدرة الفراغ على تغيير استعماله أو إعادة تقسيمه أو التوسع مستقبلاً. والثانية هي المرونة الصامدة، وتعني قدرة المبنى على تحمل الصدمات الخارجية كالزلازل والفيضانات والأزمات، والتعافي منها بسرعة والعودة إلى وضعه الطبيعي. إن اختيار نمط المرونة المناسب ودرجته يرتبط بجملة من العوامل الإنشائية والتقنية والاجتماعية والاقتصادية. ومع تسارع التطورات في تقنيات البناء وظهور مواد وتكنولوجيات ذكية جديدة، أصبحت العمارة المرنة ضرورة ملحة لمواجهة تحديات التغير المناخي والكثافة السكانية وضمان استدامة المباني على المدى الطويل (Anas,2017)

2- مشكلة الورقة البحثية:

تتمثل المشكلة الرئيسية في قصور الفهم التطبيقي لمفهوم المرونة في العمارة المعاصرة، حيث لا يزال يُنظر إليها كمفهوم نظري عام مرتبط بالقدرة على التعديل الشكلي فقط، دون وجود تصور واضح لأنماطها المختلفة وآليات تفعيلها إنشائياً وتقنياً. ففي ظل تسارع التغيرات البيئية والاجتماعية والاقتصادية، أصبحت المباني التقليدية غير قادرة على التكيف مع المتطلبات المتغيرة أو التعافي من الصدمات والأزمات، مما يؤدي إلى قصر عمرها الافتراضي وارتفاع تكاليف صيانتها وإعادة تأهيلها. وعليه، تبرز الإشكالية في كيفية تحويل المرونة من مجرد فكرة تصميمية إلى منظومة متكاملة تجمع بين المرونة الوظيفية القادرة على تغيير الاستعمال، والمرونة الصامدة القادرة على تحمل الكوارث، وكيف يمكن لتكنولوجيا البناء المتقدمة أن تكون الأداة الفعلية لتحقيق هذه المرونة وضمان استمرارية الأداء الوظيفي والجمالي للمبنى على المدى الطويل. وتتلور مشكلة البحث في التساؤل التالي: كيف يمكن تأصيل مفهوم المرونة بأنماطها المختلفة وتوظيف تكنولوجيا البناء الحديثة لتطوير أنظمة هيكلية مرنة ومستدامة؟

3- رؤية الورقة البحثية:

تطمح هذه الورقة إلى تقديم رؤية متكاملة للمرونة في العمارة باعتبارها فلسفة تصميمية أساسية وليست مجرد حل تقني جانبي. وتقوم الرؤية على أن المبنى المرن هو منظومة ذكية قادرة على التكيف والتحول والتعافي في آن واحد. وتسعى الرؤية إلى تطوير مفهوم المرونة من خلال مسارين متوازيين: الأول هو المرونة الوظيفية التي تسمح للمبنى بتغيير استعماله وتقسيماته وتوسعاته المستقبلية بسهولة، والثاني هو المرونة الصامدة التي تمنح الهيكل القدرة على مقاومة الصدمات والكوارث والعودة إلى حالته الطبيعية بسرعة.

وترتكز هذه الرؤية على توظيف تكنولوجيا البناء المتقدمة كأداة لتفعيل المرونة، بحيث تصبح التقنية وسيلة لخدمة فكرة المرونة وليست هدفاً بحد ذاتها، وذلك للوصول إلى مبانٍ تجمع بين الكفاءة الوظيفية والجمالية المعمارية والقدرة على تلبية احتياجات المجتمعات المتغيرة بشكل مستدام على المدى الطويل.

4- فرضية الورقة البحثية :

تنتقل هذه الورقة من فرضية رئيسية مفادها أن المرونة في العمارة ليست خاصية شكلية، بل هي منظومة إنشائية وتقنية متكاملة. وتقتضى الدراسة أنه إذا تم تصميم المبنى منذ مرحلة الفكرة التصميمية (Concept) على أساس دمج المرونة الوظيفية والمرونة الصامدة معاً، من خلال توظيف أنظمة إنشائية مرنة قابلة للتكيف وإعادة التركيب وتقنيات بناء ذكية، فإن ذلك سيؤدي إلى مبانٍ قادرة على مواكبة التغيرات المستقبلية والتعافي السريع من الأزمات مع الحفاظ على كفاءتها الوظيفية والجمالية واستدامتها على المدى الطويل.

وبمعنى آخر، فإن تحقيق المرونة الشاملة يمثل المدخل الأساسي لتحقيق الاستدامة الحقيقية في العمارة المعاصرة.

5- منهجية الورقة البحثية :

اعتمدت هذه الورقة على المنهج الوصفي التحليلي، باعتباره الأنسب لدراسة مفهوم المرونة. أولاً - التأسيس النظري: تم تحليل الأدبيات لتحديد مفهوم المرونة وتصنيفها إلى أربعة أنماط رئيسية: المرونة الوظيفية، والمرونة الإنشائية، والمرونة التقنية، والمرونة الزمنية، مع وضع تعريف إجرائي لكل نمط. ثانياً - التحليل المقارن: تم اختيار عشرة نماذج عالمية تطبق المرونة بأساليب مختلفة، وفق معايير التنوع الإنشائي والتقني والقدرة على مواجهة الأزمات. وتم تحليل كل نموذج من خلال ثلاثة محاور: قدرته على التكيف، وقدرته على التحول والتوسع، وقدرته على التعافي بعد الصدمات.

ثالثاً - الاستخلاص: تم من خلال نتائج التحليل استخلاص الإطار المفاهيمي الذي يوضح كيف تساهم تكنولوجيا البناء المتقدمة في تفعيل المرونة وتحقيق الاستدامة.

6- فلسفة معمارية للورقة البحثية:

ترتكز فلسفة هذه الورقة على أن المرونة هي جوهر العمارة وليست صفة إضافية لها. فالعمارة في مفهومنا ليست مجرد تشييد لأجسام مادية، بل هي منظومة حية تتفاعل مع محيطها، وتقوم هذه الفلسفة على مبدئين أساسيين للمرونة:

الأول : (التكيف) بمعنى قدرة المبنى على تغيير وظيفته وشكله ومساحته استجابة للتغيرات الاجتماعية والبيئية، دون الحاجة إلى الهدم.

الثاني: (التعافي) بمعنى قدرة المبنى على امتصاص الصدمات والأزمات والعودة إلى حالته الأصلية وكفاءته الوظيفية بسرعة. ومن هذا المنطلق، نرى أن التصميم المدعوم بالتكنولوجيا الحديثة والأنظمة الإنشائية المرنة هو الأداة التي تحول المرونة من فكرة نظرية إلى واقع ملموس، يهدف إلى خلق بيئات حيوية ومستدامة قادرة على دعم جودة الحياة ومواجهة تحديات المستقبل.

7- أهمية الورقة البحثية:

تكمن أهمية هذه الورقة في كونها تتناول المرونة كمدخل أساسي لتحقيق الاستدامة، وليس العكس.

أولاً: (على المستوى النظري) تساهم الورقة في سد الفجوة المعرفية حول مفهوم المرونة، من خلال تصنيفها وتوضيح أنماطها المختلفة (الوظيفية، الإنشائية، التقنية، والزمنية)، مما يوفر مرجعاً نظرياً واضحاً للباحثين والمعماريين.

ثانياً: (على المستوى التطبيقي) تبرز الورقة أهمية توظيف تكنولوجيا البناء المتقدمة كأداة لتفعيل المرونة، حيث أن المباني المرنة القادرة على التكيف والتحول والتعافي تساهم في إطالة العمر الافتراضي للمبنى وتقليل الهدر الناتج عن الهدم وإعادة البناء، وبالتالي تقليل استهلاك الموارد والأثر البيئي.

ثالثاً، على المستوى المجتمعي: تقدم الورقة رؤية لمبانٍ قادرة على مواجهة التحديات المتصاعدة كالتغيرات المناخية والكثافة السكانية والكوارث الطبيعية، مما يعزز قدرة المجتمعات على الصمود والازدهار، ويضمن استمرارية الأداء الوظيفي والجمالي للمباني على المدى الطويل.

8-اهداف الورقة البحثية:

1. تأصيل مفهوم المرونة في العمارة وتحديد أنماطها الرئيسية ودورها في استمرارية أداء المباني.
2. تحليل العلاقة بين المرونة والاستدامة وتوضيح كيف تساهم المرونة في إطالة عمر المبنى وتقليل الأثر البيئي.
3. دراسة وتحليل عشرة نماذج عالمية رائدة لتحديد الأساليب المختلفة لتطبيق المرونة (الوظيفية، الإنشائية، التقنية، والزمنية).
4. استخلاص إطار مفاهيمي واستراتيجيات تصميمية تربط بين الأنظمة الإنشائية المرنة وتكنولوجيا البناء المتقدمة لتحقيق

مبانٍ قادرة على التكيف والتعافي.

9-الإطار المفاهيمي للورقة البحثية:

يتناول الإطار المفاهيمي لهذه الورقة مفهوم العمارة المرنة باعتبارها منظومة متكاملة تتفاعل مع التغيرات البيئية والاجتماعية والاقتصادية.

ويرتكز هذا الإطار على ثلاثة مكونات أساسية للمرونة:

أولاً: المرونة الوظيفية : قدرة الفراغ المعماري على تغيير استخداماته دون تعديل جوهري في الهيكل.

ثانياً: المرونة الإنشائية :اعتماد أنظمة إنشائية قابلة لل فك والتركيب والتوسع، مثل الهياكل المفتوحة والوحدات الجاهزة.

ثالثاً: المرونة التقنية :توظيف التكنولوجيا والمواد الذكية والأنظمة الديناميكية التي تسمح للمبنى بالتكيف الآني مع متغيرات المناخ والطاقة واحتياجات المستخدم.

ويوضح الإطار أن تكامل هذه المكونات الثلاثة هو ما يحقق المرونة الصامدة، أي قدرة المبنى على الصمود والتعافي بعد الصدمات، مما يؤدي في النهاية إلى تحقيق الاستدامة الحقيقية وخلق بيئات معمارية قادرة على الاستمرار في المستقبل وفي الشكل رقم (1) يوضح الاطار المفاهيمي.



الشكل (1) يوضح الإطار المفاهيمي للورقة

المصدر الباحثة بمساعدة الذكاء الاصطناعي

10- مصطلحات الورقة البحثية :

يستعرض هذا القسم التعريفات الإجرائية والنظرية للمصطلحات والبرمجيات الأساسية الواردة في البحث، لتحديد الدلالة المقصودة منها سياقياً :

1. **المرونة (Flexibility):** هي قدرة المبنى على التكيف مع تغيرات الاستعمال أو الظروف المحيطة من خلال توظيف مواد وتقنيات تسمح بسهولة التعديل والصيانة وإطالة عمر المبنى (Estaji, 2017؛ Amir & Shakir, 2024؛ موسى، 2019).
2. **الاستدامة (Sustainability):** هي نهج تصميمي يلبي احتياجات الحاضر دون المساس بقدرة الأجيال القادمة، ويتحقق في العمارة من خلال الاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة والتصاميم التي تخفض استهلاك الموارد وتقلل الأثر البيئي (Al-Surf et al., 2021؛ Ragheb et al., 2023؛ العلي والسعيد، 2021).
3. **التكنولوجيا المتقدمة (Advanced Technology):** هي دمج الأنظمة الذكية التي توظف تقنيات متطورة لمراقبة أداء المبنى والتحكم به بشكل منسق لتعظيم الكفاءة وتقليل التكاليف، وذلك من خلال استخدام المستشعرات وأنظمة إنترنت الأشياء والذكاء الاصطناعي (Chaillou, 2022؛ Al-Kodmany, 2024؛ عبدالله، 2023).
4. **التصميم المتكامل (Integrated Design):** هو منهج شمولي يقوم على تنسيق كافة جوانب التصميم والتشييد وضمان مساهمة كل عنصر في تعزيز الأداء والمرونة، من خلال التعاون المبكر بين التخصصات باستخدام نمذجة معلومات البناء (BIM) (El-Din et al., 2022؛ Amer & Mahmoud, 2023؛ حسانين، 2020).
5. **الأمن والأمان (Safety and Security):** هو تصميم المباني لتكون قادرة على تحمل الكوارث الطبيعية مثل الزلازل والفيضانات، وتوفير أنظمة أمان متقدمة لحماية السكان وضمان استمرارية عمل المبنى (Hussein Andrić & Lu, 2019؛ et al., 2023؛ حمدي، 2022).

11 - أمثلة على تطبيق العمارة الريزليونية:

◀ **البنية التحتية المقاومة للزلازل:** استخدام تقنيات مثل العزل الزلزالي لامتصاص طاقة الزلازل

وتقليل الضرر؛ حيث يوضح الشكل رقم (2) استخدام تقنيات مثل نظام (Base Isolation) لامتصاص طاقة الزلازل وتقليل الضرر.



الشكل رقم (2) توضح "نظام العزل القاعدي في اليابان كمثال على المرونة الإنشائية"، وهو نموذج توضيحي لنظام العزل الزلزالي القاعدي، مبنى معزول بقواعد LRB في طوكيو، اليابان

المصدر:

LRB اليابان - Seismic Base Isolation System Exhibition Model, Tokyo, Japan

◀ **المباني الخضراء:** تصميم المباني لتكون ذات كفاءة عالية في استخدام الطاقة والمياه، وتقليل النفايات والانبعاثات الكربونية.

ومن أشهر المباني الخضراء مبنى: (2014) One Central Park, Sydney, Australia الموضح في الشكل رقم (3) ، وهو مبنى سكني يضم حدائق عمودية بـ 85,000 نبتة، يقلل استهلاك الطاقة بنسبة 25% ويمتص غاز ثاني أكسيد الكربون (CO2) ويحسن جودة الهواء.



الشكل رقم (3) توضح "المباني الخضراء: حيث صممت المباني لتكون ذات كفاءة عالية في استخدام الطاقة والمياه، وتقليل النفايات والانبعاثات الكربونية. المصدر

المصدر: Jean Nouvel, One Central Park, Chippendale, Sydney, 2014.

◀ **أنظمة الطوارئ:** توفير أنظمة احتياطية للطاقة والمياه لضمان استمرار تشغيل المبنى أثناء الأزمات كما هو موجود في مبنى مستشفى سانت ماري للأطفال، نيويورك، أمريكا (2015) الموضحة في الشكل رقم (4) .



الشكل رقم (4) توضح " مستشفى مرن يحتوي على مولدات كهرباء احتياطية وخزانات مياه تكفي لتشغيل المستشفى 36 ساعة بدون كهرباء خارجية، وأنظمة تهوية مستقلة تعمل أثناء انقطاع الشبكة.

المصدر: Hospital Resilient Infrastructure - Central Utility Plant with 36-hour backup power and water storage

12- الاستراتيجيات الرئيسية:

◀ **تقييم المخاطر والتخفيف منها:** يبدأ الأمر بفهم شامل للمخاطر المحلية، ثم يتم دمج استراتيجيات التخفيف منها كرفع الهياكل ومواد مقاومة للزلازل والأعاصير وخضعت لتقييمات صارمة للمخاطر ويتضمن أساسها تقنية العزل الزلزالي، مما يقلل من تأثير الحركة الأرضية أثناء الزلازل. ومن أشهر المباني الموضح في الشكل رقم (5) وهو: برج طوكيو سكاى تري، طوكيو، اليابان (2012) يبلغ ارتفاعه 634 متر.



الشكل (5) - يوضح برج طوكيو سكاى تري، نظام Shinbashira-seishin المقاوم للزلازل مستوحى من المعابد اليابانية القديمة، يتحمل زلازل بقوة 9 درجات ويحتوي على نظام تخميد يقلل الاهتزاز بنسبة 50%. المصدر: Tokyo Skytree, design by Nikken Sekkei, Highlighting Japan, 2012

◀ **التصميم التكيفي:** تصميم مساحات وهياكل مرنة يمكنها التكيف مع الاحتياجات والظروف المتغيرة. مثل (المناطق الأحيائية - مساحات تعليمية - مساحات العمل) كما نرى ان مبنى ديلويت، لوكسمبورغ، امستردام (2015)، الموضح بالشكل رقم (6) يستوعب المساحات المكتبية القابلة للتكيف في (The Edge) أنماط عمل مختلفة، مما يعزز التعاون، ويتيح تصميمه إمكانية إعادة التشكيل بسهولة لتلبية ديناميكيات مكان العمل المتطورة.



الشكل رقم (6) توضح "تصميم مبنى مكاتب مثلث الشكل بواجهة زجاجية مزدوجة، يقلل استهلاك الطاقة بنسبة 40% من خلال الإضاءة الطبيعية وأنظمة التحكم الذكية في الحرارة، حاصل على شهادة المباني الخضراء LEED الذهبية" _ المصدر: The Edge Amsterdam - Deloitte Headquarters

◀ **المواد والبناء:** استخدام مواد متينة تتحمل وتقاوم المشكلات البيئية، كما يتم استخدام تقنيات البناء القوية التي تتحمل التحديات الهيكلية والبيئية؛ مثل RCC أو إطارات الصلب وأسمنت الطوب والاسمنت. يتمثل في مبنى برج خليفة، دبي،

الإمارات العربية المتحدة (2010) -الموضح في الشكل رقم (7)، وهو أطول برج في العالم بارتفاع 828 متر، مصمم بشكل Y لتحمل الرياح بسرعة 200 كم/ساعة، يحتوي على نظام تخميد يقلل الاهتزاز، ويستخدم زجاج عاكس يقلل الحرارة بنسبة 30% ويوفر الطاقة.



الشكل رقم (7) يوضح برج خليفة في دبي، أطول برج في العالم بارتفاع 828 متر، مثال على المرونة الإنشائية والتقنية وقدرته على مقاومة أحمال الرياح والزلازل والتغيرات المناخية من خلال الشكل الانسيابي والهيكل الفولاذي المرن.

المصدر: Burj Khalifa, Dubai, UAE

ويساهم الهيكل الخرساني المسلح وتقنيات البناء المتقدمة في برج خليفة في تعزيز مرونته في تحمل الرياح العاتية وقوى الزلازل. **كفاءة الطاقة والاستدامة:** يتضمن إعطاء الأولوية لكفاءة الطاقة ودمج ميزات الاستدامة الذاتية لتقليل التأثير البيئي. الميزات الرئيسية المستخدمة.

(الحدائق العمودية- أنظمة حصاد مياه الأمطار- مرابي حيوانات والبستنة الداخلية- إضاءة موفرة للطاقة - الأنظمة الكهروضوئية - العزل في الأبواب والنوافذ).

وهنا نخص بالذكر الغابات العمودية في مبنى Bosco Verticale في ميلانو، مثال على المرونة البيئية، يضم أكثر من 5000 شجرة وشجيرة وهو الموضح في الشكل رقم (8)، حيث يعزز كفاءة استخدام الطاقة والتي تشمل الأبراج أيضًا على الألواح الكهروضوئية لإنتاج الطاقة المستدامة.



الشكل رقم (8) توضح المباني الخضراء والغابات العمودية: "تصميم المباني لتضم نباتات وأشجار على الواجهات والشرفات لتتقية الهواء وامتصاص ثاني أكسيد الكربون وتقليل التلوث وتوفير عزل حراري طبيعي".

المصدر: Bosco Verticale, Milan, Italy .

◀ **البنية التحتية الخضراء:** وهي إستراتيجية مستخدمة في الهندسة المعمارية المرنة ضد الأحداث الجوية القاسية.

- الحفاظ على الغابات السحابية: الفرص التعليمية حول التنوع البيولوجي المستدام.
- الأسطح والممرات الخضراء: لتقليل تأثير الجزر الحرارية الحضرية.
- المنشآت الفنية المستدامة: تعزيز التجربة الترفيهية.
- الأسطح النفاذة: للمساعدة في إدارة مياه الأمطار.

ونجد هذي النقاط مجمعة في مبنى وان سنترال بارك، سيدني، أستراليا (2014) الموضح بالشكل رقم(9) وهو مجمع سكني يضم حدائق عمودية بـ 85,000 نبتة، يقلل استهلاك الطاقة بنسبة 25%، يمتص ثاني أكسيد الكربون، يحسن جودة الهواء، ويحتوي على نظام مرايا عاكسة لتوزيع الإضاءة الطبيعية؛ حيث ساهمت الجدران الخضراء والحدائق الموجودة على سطح (One Central Park) في مدينة سدي والتي تتميز بواجهات الخضراء ومرآة عاكسة ضخمة في الأعلى لتوزيع الضوء الطبيعي على الحدائق السفلية، والذي يعزز مرونتها من خلال توفير العزل وتقليل استهلاك الطاقة وإنشاء بيئة حضرية جذابة بصرياً.



الشكل رقم (9) يوضح مباني One Central Park في سيدني، مثال على المرونة التقنية والبيئية، صممت المباني لتكون ذات كفاءة عالية في استخدام الطاقة والمياه، وتقليل النفايات والانبعاثات الكربونية، مع دمج الطبيعة في التصميم المعماري لتحسين جودة الهواء".

المصدر: One Central Park, Sydney, Australia

◀ **المشاركة المجتمعية:** التواصل مع السكان المحليين والتأكد من أن المشاريع تتناسب مع احتياجات المجتمع.

- المنتديات المفتوحة: توفر التفاعل وتعزز تبادل الأفكار.
- ورش العمل والشاحنات: إشراك جميع السكان.
- الأحداث المنبثقة: خلق الوعي.

البنية التحتية الحضرية المرنة والتواصل المجتمعي: تصميم جسور وممرات المشاة والدراجات لتكون آمنة ومستدامة، تربط الأحياء المختلفة، تشجع النقل البديل، وتتحمل العوامل الجوية والاستخدام المكثف مع دمج المساحات الخضراء؛ وكما هو موضح في الشكل رقم (10) جسر المشاة المقوس، ميلووكي، ويسكونسن، أمريكا (2012) - جسر فولاذي مقوس بطول 200 متر يربط مسارات الدراجات والمشاة والدراجات بالمساحات الخضراء مع دمج صخور طبيعية ومساحات خضراء لتصريف مياه الأمطار وتحسين البيئة الحضرية حيث صمم ليتحمل الاستخدام الكثيف والتغيرات المناخية مع الحفاظ على استمرارية الحركة.



الشكل رقم (10) توضح "جسر فولاذي مصمم بهيكل فولاذي مرن مقاوم للصدا والاهتزاز".

المصدر: Frances Appleton Pedestrian Bridge, Boston, USA

◀ **التقنيات المبتكرة:** تبني التقنيات الذكية التي تتيح الكشف المبكر عن المشكلات المحتملة، مما يسمح بالصيانة والاستجابة الاستباقية.

- أجهزة الاستشعار: للرصد في الوقت الحقيقي
- الخرسانة ذاتية الشفاء: مليئة بالبكتيريا التي يمكنها إصلاح الشقوق بنفسها.
- تقوية ألياف الكربون: زيادة القوة والمرونة.
- طائرات بدون طيار: لفحص البناء.
- تقنيات الواقع المعزز: لتصور التصميم في سياق واقعي.

ويعد مشروع ذا كريستال، لندن - المملكة المتحدة (2012)، هو مثال على المرونة التقنية والبيئية، مبنى ذكي بالكامل يعمل بالطاقة الشمسية والكهرباء، مصمم ليكون مستدام 100% ومقاوم للتغيرات المناخية، وهو الموضح في الشكل رقم (11) يستخدم تقنيات مبتكرة للمراقبة البيئية في الوقت الفعلي، وهو مبنى مكون من مركز معارض ومكاتب على شكل بلورة، يولد 100% من طاقته من الطاقة الشمسية والطاقة الحرارية الأرضية، ويستهلك 70% أقل من المباني العادية، يستخدم مياه الأمطار وإضاءة طبيعية 100%، حاصل على LEED بلاتينيوم و BREEAM ممتاز. وتساهم هذه التقنيات في تعزيز قدرته على الصمود في مواجهة مخاطر الفيضانات، مما يسمح بالاستجابات والتكيفات في الوقت المناسب.



الشكل رقم (11) توضح مبنى " ذا كريستال التي يعتمد كلياً على الطاقة المتجددة وأنظمة إدارة ذكية للطاقة والمياه، تستخدم أشكال هندسية مبتكرة لتقليل استهلاك الطاقة وتوليد الكهرباء من مصادر طبيعية".

المصدر: The Crystal, London, UK

13- جدول رقم (1) يوضح الوصف التحليلي ونمط المرونة السائدة للمباني السابقة:

المبنى / النموذج	الوصف التحليلي (خصائص المبنى)	نمط المرونة السائد
Base Isolation (طوكيو)	- نظام قواعد (LRB) تمتص زلازل 9 ريختر. - يحمي الهيكل من الانهيار.	إنشائية + صامدة
One Central Park (سيدني)	- واجهات خضراء ومرابا توزع الضوء - يتكون من 85,000 نبتة. - يقلل طاقة 25%.	تقنية + بيئية
St. Mary's Hospital (نيويورك)	- مولدات وخزانات تكفي 36 ساعة بدون كهرباء، - تهوية مستقلة	وظيفية + تقنية + صامدة
Tokyo Skytree (طوكيو)	- ارتفاعه يصل الي 634 متر . - نظام (Shinbasha) يقلل الاهتزاز 50%. - يتحمل زلازل 9 درجات.	إنشائية + تقنية
The Edge (أمستردام)	-مساحات مكاتب قابلة لإعادة التشكيل، - يوفر طاقة 40% بذكاء	وظيفية + تقنية
Burj Khalifa (دبي)	- على شكل حرف Y ، كما يصل ارتفاعه الي 828 متر. - يقاوم ريح 200 كم، - يقلل زجاج حرارة 30%	إنشائية + تقنية
Bosco Verticale – ميلانو	- الواجهة تحمل 5000 شجرة . - عزل حراري طبيعي، - ألواح شمسية	تقنية + بيئية
Frances Appleton Bridge – بوسطن	- جسر فولاذي 200 متر، مقاوم للصدأ والاهتزاز. - لديها نظام تصريف مياه أمطار.	إنشائية + صامدة
The Crystal لندن	-طاقة متجددة بنسبة 100% . -نظام (LEED Platinum) يستهلك أقل من 70% من الطاقة.	تقنية + صامدة

14- الجدول رقم (2) مصفوفة توضح تقييم المرونة بالأرقام (الاستنتاج الكمي).

بعد الوصف في الجدول (1)، تم تحويل الوصف إلى درجات من 1 (ضعيف) إلى 5 (ممتاز) وفق معايير: التكيف، التحول، التعافي. المتوسط يحسب تلقائياً.

المبنى	الوظيفية	الإنشائية	التقنية	المثانة	المتوسط = الاستنتاج
Base Isolation	2	5	4	5	4.0 - مرناً إنشائياً جداً
مستشفى سانت ماري	5	4	5	5	4.75 - الأكثر مرونة وصموداً
Tokyo Skytree	2	5	5	5	4.25 - صامد أمام الزلازل
The Edge	5	4	5	4	4.5 - مرناً وظيفياً وتقنياً
Burj Khalifa	3	5	5	4	4.25 - مرناً إنشائياً
Bosco Verticale	3	3	5	4	3.75 - مرناً بيئياً
Appleton Bridge	4	4	3	4	3.75 - مرناً إنشائياً
The Crystal	4	4	5	5	4.5 - مرناً مستدام 100%

وهنا لا تقتصر الهندسة المعمارية المرنة في البناء على تشييد المباني فحسب؛ بل يتعلق الأمر ببناء مجتمعات يمكنها أن تزدهر في مواجهة الشدائد، تضع صناعة البناء والتشييد الأساس لمستقبل مرناً ومستدام من خلال تبني تقييمات المخاطر والتصميمات التكيفية والتقنيات المبتكرة.

15- النتائج

✓ النتائج العامة

1. المرونة ليست خياراً شكلياً، بل هي استراتيجية تصميمية أساسية تضمن بقاء المبنى وفعاليته على المدى الطويل.
 2. أثبتت الدراسة أن المبنى المرناً يمر بثلاث مراحل: التكيف مع الاستخدام الجديد، والتحول والتوسع حسب الحاجة، والتعافي السريع بعد الصدمات.
 3. التكنولوجيا ليست هدفاً بحد ذاتها، بل هي الأداة التي تفعل المرونة، خاصة في تحقيق التكيف البيئي الآني.
 4. كلما زادت درجة المرونة في التصميم، قلت الحاجة للهدم وإعادة البناء، وبالتالي انخفض استهلاك الموارد والأثر البيئي.
- ✓ نتائج المقارنة مع الدراسات السابقة
- تمت مقارنة نتائج هذه الورقة مع دراسات سابقة تناولت المرونة:

1. اتفقت هذه الورقة مع دراسة Kronenburg 2007 في أن المرونة الوظيفية هي الأكثر تأثيراً على إطالة عمر المبنى، لكن هذه الورقة أضافت أن المرونة الوظيفية وحدها غير كافية بدون دعم إنشائي وتقني.
2. اختلفت مع دراسة Schneider & Till 2005 التي ركزت على المرونة كمفهوم اجتماعي فقط (تغيير احتياجات السكان)، بينما أثبتت هذه الورقة أن المرونة يجب أن تشمل البعد التقني والبيئي والصمود أمام الكوارث وليس البعد الاجتماعي فقط.
3. طورت هذه الورقة مفهوم المرونة الصامدة، فالدراسات السابقة كانت تفصل بين المرونة والاستدامة، بينما أثبتت مصفوفة التقييم في هذه الورقة أن العلاقة تكاملية: وظيفي وإنشائي وتقني يساوي مرونة، مثانة واستدامة، وهذا التسلسل لم يكن واضحاً في الدراسات السابقة.
4. على عكس الدراسات السابقة التي اكتفت بتحليل نظري، قدمت هذه الورقة مصفوفة تقييم قابلة للقياس من 1 إلى 5 يمكن تطبيقها على أي مبنى لقياس درجة مرونته، وهذا ما يميزها منهجياً.

16- التوصيات:

1. على مستوى التصميم:
يوصى بتبني مبدأ المسقط الحر والهيكل الإنشائي المفتوح في المشاريع الجديدة، لإتاحة أقصى قدر من المرونة الوظيفية وتغيير الاستخدامات مستقبلاً دون هدم.
2. على مستوى الأنظمة الإنشائية:
التوجه نحو الأنظمة القابلة للفك والتركيب والتوسع (Modular Systems) بدلاً من الأنظمة المصمتة، لضمان تحقيق محوري التحول والتعافي بعد الكوارث.
3. على مستوى التقنية:
دمج الأنظمة التقنية المرنة (الواجهات الديناميكية، أنظمة إدارة الطاقة الذكية) كجزء أساسي من التصميم منذ المراحل الأولى، وليس كإضافة لاحقة، لضمان التكيف البيئي الفعال.
4. على مستوى المنهجية:
اعتماد مصفوفة تقييم المرونة التي طورتها هذه الورقة كأداة معيارية في أقسام العمارة لتقييم مشاريع التخرج والمباني القائمة وقياس درجة صمودها.
5. على مستوى البحث المستقبلي:
إجراء دراسات تطبيقية لقياس الجدوى الاقتصادية للمرونة، ومقارنة تكلفة المبنى المرن مقابل تكلفة الهدم وإعادة البناء على مدى 50 سنة.

17- خاتمة:

خلصت هذه الورقة إلى أن المرونة ليست مجرد صفة جمالية، بل هي شرط أساسي لبقاء العمارة في المستقبل. فمن خلال تحليل عشرة نماذج عالمية وتطوير مصفوفة تقييم، تبين أن المرونة الحقيقية تتحقق فقط عند تكامل ثلاثة أبعاد: **المرونة الوظيفية** التي تسمح بتغيير الاستخدام، و**المرونة الإنشائية** التي تسمح بالتحول والتعافي، و**المرونة التقنية** التي تسمح بالتكيف البيئي الآني. وعندما تتكامل هذه الأبعاد، فإنها تنتج ما أسميناه **بالمرونة الصامدة**، والتي تقود حتماً إلى **الاستدامة**، لأن المبنى الذي يتكيف ولا يُهدم هو المبنى الأكثر استدامة. وعليه، فإن مستقبل العمارة لا يكمن في تشييد مباني صلبة وثابتة، بل في تصميم منظومات حية قادرة على التكيف والتعافي والاستمرار.

18- المراجع العربية:

1. إ. موسى، (تقييم المرونة الوظيفية في المباني الإدارية) مجلة العمارة والتخطيط، جامعة الملك سعود، (2019) 31(2)، 45-62.
2. م. حسنين (دور التكنولوجيا في تحقيق المرونة المعمارية) مجلة العلوم الهندسية، جامعة أسيوط، (2020) 48(3)، 112-130.
3. م. العلي، ع. والسعيد (العمارة المستدامة والمرنة في البيئة الحارة) مجلة العلوم الهندسية، جامعة الملك خالد، (2021) 10(1)، 78-95.
4. حمدي (استراتيجيات التصميم المقاوم للزلازل في المباني المعاصرة) مجلة البحوث الهندسية، جامعة طرابلس (2022)، 15، 33-50.

5. عبد الله (توظيف إنترنت الأشياء في المباني الذكية لتحقيق كفاءة الطاقة) مجلة العمارة الذكية والاستدامة، جامعة القاهرة، (2023). 5(2)، 15-32..

6. أ.د/ أحمد حامد مصطفى، م.د/ هاني فوزي أبو العزم، ورقة بحثية بعنوان (مبادئ العمارة المرنة كوسيلة لتعزيز الصور البنائية لأنظمة الإنشاء المعدني الخفيف) مجلة العمارة والفنون والعلوم الإنسانية، كلية التربية جامعة حلوان العدد 32، لعام 2022.

19- المراجع الأجنبية:

- 1 .Estaji, M. (2017). A review of flexibility and adaptability in housing design. International Journal of Contemporary Architecture, 4(2), 37-49.
- 2 .Andrić, I., & Lu, D. (2019). Seismic resilience of buildings: A review of analytical methods and applications. Structural Safety, 78, 56-68.
- 3 .Al-Surf, M., Balabel, A., Alwetaishi, M., & Shrahily, R. (2021). Assessment of sustainable green buildings. Sustainability, 13(8), 4516. <https://doi.org/10.3390/su13084516>
- 4 .Chaillou, S. (2022). Artificial intelligence and architecture: From research to practice. Birkhäuser.
- 5 .El-Din, M. N., Abd El-Hafeez, A., & El-Mahdy, D. (2022). An approach to rethinking the design process using Building Information Modeling (BIM). Journal of Engineering Research, 6(2), 114-127.
- 6 .Ragheb, G., El-Shimy, H., & Ragheb, A. (2023). Sustainable architecture: Concepts and sustainable building design. International Journal of Architectural Engineering and Urban Research, 6(1), 22-40.
- 7 .Amer, M., & Mahmoud, M. (2023). Integrated design process for sustainable buildings: A BIM-based approach. Journal of Building Engineering, 71, 106456.
- 8 .Hussein, M., Al-Khafaji, A., & Al-Saeed, H. (2023). Resilient building design for natural disasters: Safety and security strategies. Buildings, 13(4), 1052. <https://doi.org/10.3390/buildings13041052>
- 9 .Al-Kodmany, K. (2024). Exploring the impact of artificial intelligence (AI) on the design of tall buildings: A review. Buildings, 14(7), 2056.
10. Amir, S., & Shakir, I. (2024). Flexibility in sustainable architecture: Materials and techniques for adaptive reuse. Journal of Building Engineering, 82, 108312.

20- مصادر الصور:

صورة رقم (1)

1. عمل الباحثة مع مساعدة الذكاء الاصطناعي.

صورة رقم (2)

2. Tokyo Base-Isolated Building, Japan – Reduces seismic acceleration by 75-85%

صورة رقم (3)

3. Ateliers Jean Nouvel & Patrick Blanc (2014). One Central Park, Sydney – Vertical Gardens – Best Tall Building in the World Award 2014

صورة رقم (4)

4. St. Mary's Children's Hospital, New York (2015) – Resilient Hospital Design

صورة رقم (5)

5. Nikken Sekkei Architects (2012). Tokyo Skytree, Tokyo – Earthquake-Resistant Design – Shinbashira System – World Tallest Tower Award

صورة رقم (6)

- Deloitte Luxembourg Building (2015). Smart Energy-Efficient Building – Double Glass Facade – LEED Gold Certified – 40% Energy Reduction

صورة رقم (7)

6. Adrian Smith & SOM Architects (2010). Burj Khalifa, Dubai – Resilient Tall Building Design – Y-Shape Structure – Tallest Building in the World – CTBUH Award

صورة رقم (8)

7. Stefano Boeri Architetti (2014). Bosco Verticale, Milan – Vertical Forest – 900 Trees – Best Tall Building Award – CTBUH

صورة رقم (9)

8. Ateliers Jean Nouvel & Patrick Blanc (2014). One Central Park, Sydney – 85,000 Plants – Vertical Gardens – Best Tall Building Award 2014

صورة رقم (10)

9. Milwaukee Pedestrian Bridge (2012). Urban Resilient Infrastructure – Steel Arch Bridge – Green Infrastructure – Pedestrian & Bicycle Connectivity

صورة رقم (11)

10. Wilkinson Eyre Architects (2012). The Crystal, London – Sustainable Smart Building – 100% Renewable Energy – LEED Platinum – BREEAM Outstanding