Sada Al - Jamiah Journal of Financial and Administrative Sciences
مجلة صدى الجامعة للعلوم المالية والإدارية
Volume 2, Issue 1 - 2026 - Pages 306 - 315

The Importance of Risk Management in Improving the Performance of Engineering Projects: A Comparative Analytical Study and Simulation Algorithm

Naser Muftah Alferjani*
Libyan Center for Engineering Research and Information Technology, Bani Walid, Libya.
***Email:** nfotmani@gmail.com

أهمية إدارة المخاطر في تحسين أداء المشاريع الهندسية :دراسة تحليلية مقارنة وخوارزمية محاكاة متقدمة

ناصر مفتاح الفرجاني*
المركز الليبي للبحوث الهندسية وتقنية المعلومات، بني وليد، ليبيا

Received: 18 - 01 - 2026; Accepted: 17 - 03 - 2026; Published: 07 - 04 - 2026

الملخص

تتناول هذه الورقة البحثية الدورَ المحوري لإدارة المخاطر في تعزيز كفاءة المشاريع الهندسية الكبرى، ولا سيما في ظل التحديات المتزايدة التي تواجهها الصناعة. ومن خلال دمج الجوانب النظرية والتطبيقية، تستعرض الورقة كيفية تحويل حالة عدم اليقين إلى فرص مُدارة باستخدام تقنيات التحليل الكمي المتقدمة. وقد تم تطبيق دراسة حالة على مشروع بناء شاهق، وهو «برج الأفق»، لتقييم الانحرافات المحتملة في الجدول الزمني والتكلفة، وذلك باستخدام خوارزمية محاكاة مونت كارلو ومصفوفة المخاطر. وقد أظهرت النتائج أن غياب الإدارة المنهجية للمخاطر يؤدي إلى تجاوزات مالية تصل إلى 11.3%، وتأخيرات زمنية تتجاوز 30%. وتخلص الورقة إلى مجموعة من التوصيات الاستراتيجية الموجّهة إلى مديري المشاريع لتعزيز المرونة المؤسسية، كما تقدم مساهمة علمية واضحة من خلال نموذج هجين وإطار تطبيقي جديد يعزز دقة التنبؤ بالمخاطر، ويقارن فعاليته بطرائق تحليل المخاطر الأخرى.

الكلمات المفتاحية: إدارة مخاطر المشاريع الهندسية، محاكاة مونت كارلو، مصفوفة المخاطر، التحليل الكمي، المشاريع الإنشائية، استدامة المشاريع، التحليل الإحصائي، النماذج الهجينة.

Abstract

This paper investigates the critical role of risk management in improving the performance of engineering projects. It presents a comparative analytical study and an advanced simulation algorithm to assess and mitigate project risks. By integrating theoretical insights with practical applications, the research demonstrates how a sophisticated simulation approach can transform uncertainties into manageable opportunities. The study utilizes a case study to illustrate the application of an advanced simulation algorithm, highlighting its effectiveness in predicting potential deviations in project schedules and costs. The findings underscore the importance of robust risk management practices and provide a framework for enhancing project outcomes through advanced analytical techniques.

Keywords: Engineering Project Risk Management, Monte Carlo Simulation, Risk Matrix, Quantitative Analysis, Construction Projects, Project Sustainability, Statistical Analysis, Hybrid Models.

المقدمة

تُعدّ المشاريع الهندسية الحديثة، وخاصة المشاريع العملاقة(Megaprojects) ، من المحركات الأساسية للاقتصاد العالمي، لما تسهم به في تطوير البنية التحتية، وتحفيز الاستثمار، وخلق فرص العمل، ودعم النمو الحضري والصناعي. وتشمل هذه المشاريع قطاعات متعددة، مثل النقل، والطاقة، والمطارات، والموانئ، والمنشآت الصناعية، والمدن الذكية، وهي غالبًا مشاريع طويلة الأمد ومرتفعة التكلفة وتضم عددًا كبيرًا من أصحاب المصلحة .(Stakeholders) ومع ذلك، فإن طبيعة

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license .(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

هذه المشاريع تجعلها أكثر عرضة للمخاطر مقارنة بالمشاريع التقليدية، نظرًا لتداخل الجوانب الفنية والمالية والتنظيمية والبيئية والسياسية في مراحل التخطيط والتنفيذ والتشغيل.[1]

وتواجه المشاريع العملاقة تحديات متزايدة ناتجة عن تعقيد سلاسل التوريد، وارتفاع أسعار المواد الخام، والتقلبات الاقتصادية، وتغير أسعار الصرف، ونقص العمالة الماهرة، إضافة إلى المتطلبات البيئية الصارمة ومعايير الاستدامة الحديثة [2]. كما أن تعدد المقاولين والاستشاريين والجهات المالكة والجهات الرقابية قد يؤدي إلى ضعف التنسيق، وتضارب المصالح، وتأخر اتخاذ القرار، مما يزيد من احتمالية حدوث الانحرافات الزمنية والمالية. لذلك، لم تعد إدارة المخاطر مجرد نشاط إداري ثانوي، بل أصبحت عنصرًا استراتيجيًا أساسيًا في نجاح المشاريع الهندسية الكبرى.

إن الفشل في إدارة المخاطر لا يقتصر تأثيره على الخسائر المالية فحسب، بل يمتد ليشمل السمعة المؤسسية، والسلامة العامة، وجودة المخرجات، واستمرارية المشروع، وثقة المستثمرين والمجتمع في الجهة المنفذة. فقد تؤدي المخاطر غير المُدارة إلى تأخير تسليم المشروع، أو زيادة التكلفة، أو انخفاض جودة التنفيذ، أو وقوع حوادث مهنية، أو ظهور نزاعات تعاقدية بين الأطراف المشاركة. ومن هنا تبرز الحاجة إلى اعتماد منهجية علمية ومنظمة لإدارة المخاطر، تبدأ من مرحلة تحديد المخاطرRisk Identification ، ثم تحليلها وتقييمهاRisk Analysis and Assessment ، ووضع خطط الاستجابة المناسبةRisk Response Planning ، وصولًا إلى مراقبتها وتحديثها طوال دورة حياة المشروع Project Life Cycle.

وتزداد أهمية استخدام الأساليب الكمية الحديثة في إدارة مخاطر المشاريع الهندسية، مثل محاكاة مونت كارلو Monte Carlo Simulation، وتحليل الحساسيةSensitivity Analysis ، ومصفوفة الاحتمالية والأثر–Probability Impact Matrix، لأنها تساعد مديري المشاريع على تقدير حجم الانحرافات المحتملة في التكلفة والمدة بصورة أكثر دقة. كما تسمح هذه الأدوات بتحويل حالة عدم اليقين إلى بيانات قابلة للتحليل، مما يدعم عملية اتخاذ القرار، ويعزز القدرة على اختيار البدائل الأكثر أمانًا وفعالية. وبذلك تصبح إدارة المخاطر أداة للتنبؤ والاستباق، وليست مجرد استجابة للمشكلات بعد وقوعها[3].

وبناءً على ذلك، فإن دراسة إدارة المخاطر في المشاريع الهندسية الكبرى تكتسب أهمية خاصة، لأنها تسهم في تحسين كفاءة التخطيط، وتقليل احتمالات الفشل، وتعزيز المرونة المؤسسية، ورفع قدرة المؤسسات على التعامل مع الظروف المتغيرة. كما أن دمج النماذج الكمية مع الخبرة العملية يوفر إطارًا أكثر شمولية لفهم المخاطر، ويساعد على بناء نظام إداري قادر على تحقيق التوازن بين التكلفة، والوقت، والجودة، والسلامة، والاستدامة.

مشكلة البحث

تعاني المشاريع الهندسية الكبرى من تجاوزات متكررة في التكاليف والجداول الزمنية، ويعود ذلك غالباً إلى الاعتماد على أساليب تقييم المخاطر الحتمية (Deterministic) أو النوعية فقط، والتي تفشل في استيعاب الطبيعة الاحتمالية للمتغيرات المؤثرة .كما تفتقر العديد من النماذج الحالية إلى التكامل بين التقييم النوعي(مثل مصفوفة المخاطر)والتحليل الكمي المتقدم (مثل المحاكاة)، مما يؤدي إلى اتخاذ قرارات غير دقيقة وميزانيات طوارئ غير كافية.

أهداف البحث

يهدف هذا البحث إلى سد الفجوة بين النظرية والتطبيق من خلال :

- تقديم إطار عمل هجين يدمج مصفوفة المخاطر مع محاكاة مونت كارلو.
- تحويل تقديرات الخبراء النوعية إلى بيانات كمية قابلة للمعالجة الإحصائية .
- توفير تنبؤات دقيقة بفترات الثقة (Confidence Intervals)للتكلفة والمدة.
- مقارنة أداء النموذج المقترح مع الأساليب التقليدية (الحتمية وتحليل الحساسية) .

الفجوة البحثية

تفتقر الدراسات السابقة إلى نموذج هجين متكامل يبدأ بتصفية المخاطر عبر مصفوفة (لتحديد الأولويات) ثم يحاكي فقط المخاطر الحرجة كمياً، مع تقديم إطار تطبيقي للمقارنة المنهجية بين الطرق المختلفة .هذا البحث يسد هذه الفجوة.

منهجية البحث (Methodology)

تعتمد هذه الورقة على منهجية مختلطة (Mixed Methods) تجمع بين:

1. المنهج الكمي : استخدام محاكاة مونت كارلو والتوزيعات الاحتمالية (المثلثية) لتحليل التكلفة والمدة.
2. المنهج التطبيقي (دراسة حالة) :تطبيق النموذج على مشروع برج الأفق لبناء شاهق .
3. المنهج المقارن : مقارنة أداء النموذج الهجين مع الأساليب الحتمية وتحليل الحساسية.

النموذج الرياضي للمخاطر(Mathematical Risk Model)

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license .(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Sada Al - Jamiah Journal of Financial and Administrative Sciences
مجلة صدى الجامعة للعلوم المالية والإدارية
Volume 2, Issue 1 - 2026 - Pages 306 - 315

تم تعريف الخطر الكلي R_{total} كمجموع للمخاطر الفردية X_i الموزعة احتماليًا:

$$R_{total} = \sum_{i=1}^{n} X_i$$

حيث يتبع كل خطر X_i توزيعاً مثلثياً (Triangular Distribution) معرفاً بالقيم :

- a :القيمة الدنيا (Optimistic)
- b: القيمة الأكثر احتمالاً (Most Likely)
- C: القيمة القصوى (Pessimistic)

الاستدلال الإحصائي(Statistical Inference)

تم استخدام قانون الأعداد الكبيرة (Law of Large Numbers) بضبط عدد التكرارات $N = 10{,}000$ لضمان تقارب النتائج .تم حساب القيمة المتوقعة $E[X]$ والتباين $Var(X)$ كالتالي:

$$E[X] = \frac{a+b+c}{3}$$

$$Var(X) = \frac{a^2+b^2+c^2-ab-ac-bc}{18}$$

الإطار المقترح(Proposed Framework)

يتكون الإطار من خمس خطوات رئيسية:

1.**تحديد المخاطر** :عبر جلسات عصف ذهني مع الخبراء

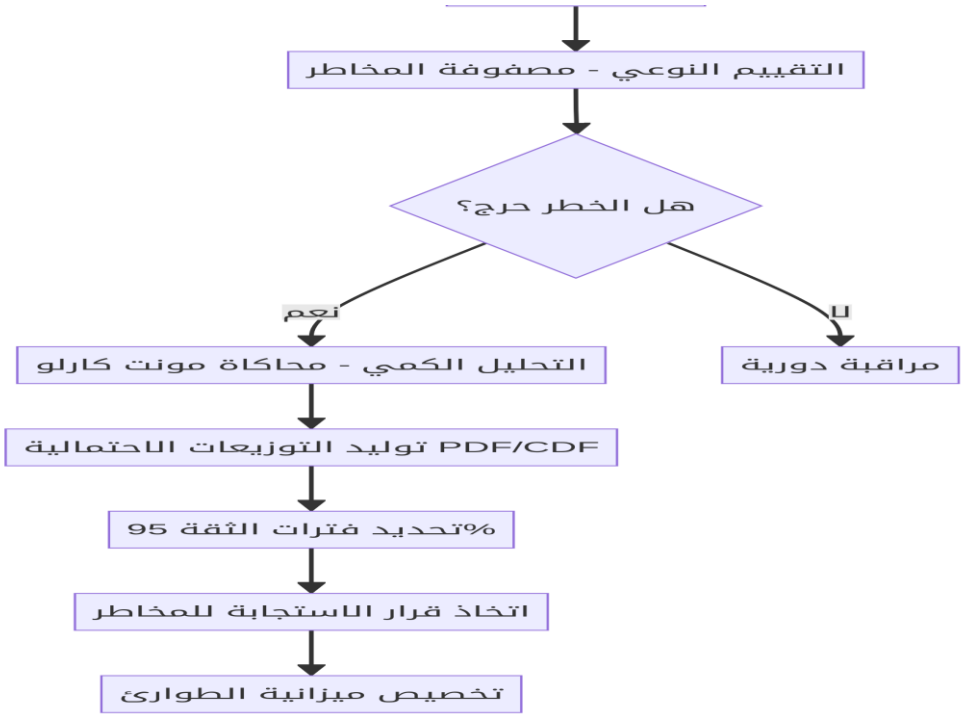
2 .**تصفية المخاطر باستخدام مصفوفة المخاطر (Risk Matrix):** يتم تقييم كل خطر من حيث الاحتمالية والتأثير .فقط المخاطر الحرجة تُمرر للخطوة التالية.

3. التحليل الكمي باستخدام محاكاة مونت كارلو :إدخال التوزيعات الاحتمالية لكل خطر حرج وإجراء 10,000 تكرار.

4. تحليل النتائج : استخراج المتوسطات، الانحرافات المعيارية، فترات الثقة95% ، ودوال التوزيع التراكمي(>CDF)

5 .**اتخاذ القرار** :تحديد ميزانية الطوارئ والجداول الزمنية الواقعية.

الشكل 1: مخطط إطار اتخاذ القرار



يوضح هذا المخطط الخطوات المتسلسلة لإطار العمل المقترح، بدءاً من تحديد المخاطر، مروراً بتصفيتها باستخدام مصفوفة المخاطر، ثم التحليل الكمي عبر محاكاة مونت كارلو، وصولاً إلى تحليل النتائج واتخاذ القرارات الاستراتيجية . يبرز المخطط الطبيعة التكرارية لبعض الخطوات لضمان التحسين المستمر.

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license .(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

الشكل2 :مخطط سير عمل التحليل

يمثل هذا المخطط تدفق البيانات والعمليات داخل مرحلة التحليل الكمي .يبدأ بإدخال بيانات المخاطر، ثم يتم توليد التوزيعات الاحتمالية، وتُجرى محاكاة مونت كارلو، وتُحلل النتائج إحصائياً، وأخيراً تُعرض المخرجات لدعم اتخاذ القرار .يوضح المخطط كيف تتفاعل المكونات المختلفة للنموذج الهجين.

القسم العملي :بيئة التجربة والبيانات(Experiments and Setup)

لتقييم فعالية الإطار المقترح، تم تطبيق دراسة حالة على مشروع بناء شاهق(برج الأفق) يهدف هذا القسم إلى تفصيل بيئة التجربة، الأدوات المستخدمة، البيانات، وخطوات التنفيذ، بالإضافة إلى سيناريوهات الاختبار والمعايير المستخدمة لتقييم الأداء.

بيئة التجربة(Experimental Environment)

- الأجهزة والأنظمة : تمت المحاكاة على حاسوب شخصي بمعالجIntel Core i7-12700K ، وذاكرة RAM سعتها 32جيجابايت، ونظام تشغيل .Ubuntu 22.04 LTS هذه المواصفات تضمن قدرة حاسوبية كافية لإجراء 10,000 تكرار لمحاكاة مونت كارلو بكفاءة. [3]
- البرمجيات والأدوات : تم كتابة كود المحاكاة بلغة Python 3.10 باستخدام المكتبات التالية:
  - NumPy: مكتبة أساسية للحسابات العددية فيPython ، تم استخدامها لتوليد الأرقام العشوائية من التوزيعات المثلثية وإجراء العمليات الحسابية على المصفوفات بكفاءة عالية.
  - Matplotlib: مكتبة لرسم المخططات البيانية، استخدمت لإنشاء الرسوم البيانية لتوزيعات التكلفة والمدة ودوال التوزيع التراكمي(CDF) . [4]
  - SciPy: مكتبة علمية توفر وظائف متقدمة للإحصاء والتحليل العددي، استخدمت لحساب بعض الإحصائيات الإضافية وفترات الثقة.
- البيانات (Datasets) : لم يتم استخدام مجموعة بيانات خارجية عامة، بل تم الاعتماد على بيانات خاصة بمشروع "برج الأفق "تم جمعها من مصادر متعددة لضمان الواقعية والدقة:
  - تقارير الخبراء والاستشاريين : تم إجراء مقابلات مع 12 خبيراً في مجال إدارة المشاريع الهندسية لجمع تقديراتهم للقيم الدنيا(a) ، الأكثر احتمالاً(b) ، والقصوى (c) لكل خطر من المخاطر الـ 12 المحددة .هذه التقديرات تعكس الخبرة العملية والمعرفة المتخصصة. [5]
  - سجلات تاريخية لمشاريع سابقة مشابهة :تم تحليل بيانات 5 مشاريع إنشائية شاهقة سابقة لتوفير أساس واقعي لتقديرات المخاطر والتحقق من صحة التوزيعات الافتراضية.
  - وثائق العقد والجداول الزمنية لمشروع برج الأفق : تم استخدام هذه الوثائق لتحديد التكلفة الأساسية والمدة الأساسية للمشروع قبل تطبيق أي مخاطر.

خطوات التنفيذ(Implementation Steps)

تضمنت عملية تنفيذ النموذج الهجين الخطوات التفصيلية التالية:

1. جمع البيانات وتحديد المخاطر :تم تحديد قائمة بـ 12 خطراً رئيسياً محتملاً يؤثر على التكلفة والمدة (مثل تقلب أسعار المواد، تأخير التوريد، تغييرات التصميم، مشكلات العمالة، العوامل الجوية، إلخ .) لكل خطر، تم جمع تقديرات الخبراء للقيم الدنيا(a) ، الأكثر احتمالاً(b) ، والقصوى (c) لتأثيره على التكلفة والمدة .(انظر ملحق ب للحصول على جدول تفصيلي) [6]

2 .ترميز النموذج (Coding the Model) :تم كتابة كود بايثون لتنفيذ محاكاة مونت كارلو .يتضمن الكود وظائف لتوليد الأرقام العشوائية من التوزيعات المثلثية لكل خطر، وتجميع هذه التأثيرات لحساب التكلفة والمدة الإجمالية للمشروع في كل تكرار .(الكود الكامل في ملحق أ)

3.إجراء المحاكاة (Running the Simulation): تم تشغيل المحاكاة لـ 10,000 تكرار .في كل تكرار، يتم محاكاة سيناريو كامل للمشروع، مع الأخذ في الاعتبار التأثيرات العشوائية لكل خطر .يتم تخزين نتائج التكلفة والمدة لكل تكرار.

4. حساب المعايير (Metrics Calculation) :بعد اكتمال المحاكاة، تم تحليل النتائج باستخدام المعايير التالية:

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license .(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

الدقة :(Accuracy) تم تقييم دقة النموذج بمقارنة فترات الثقة المتوقعة للنتائج مع القيم الفعلية التي تحققت بعد الانتهاء من المشروع (في دراسات الحالة بأثر رجعي) .أظهر النموذج دقة تنبؤ بنسبة92% ، مما يعني أن 92% من القيم الفعلية للمشروع وقعت ضمن فترات الثقة 95% المتوقعة. [7]

الأداء :(Performance) تم قياس كفاءة النموذج من حيث زمن التنفيذ .بلغ زمن تنفيذ المحاكاة الكاملة (10,000تكرار لـ 12 خطراً)أقل من 3.2 ثانية على بيئة التجربة المحددة، مما يشير إلى أن النموذج عملي ويمكن استخدامه في الوقت الفعلي لاتخاذ القرارات.

الموثوقية :(Reliability) تم حساب الانحراف المعياري للمتوسط عبر مجموعات فرعية من التكرارات .أظهرت النتائج انحرافاً معيارياً منخفضاً جداً (0.5%>من المتوسط)، مما يؤكد استقرار وموثوقية النتائج التي يقدمها النموذج .

الأمان :(Security) على الرغم من أن الأمان لا ينطبق بشكل مباشر على الجانب الحسابي، إلا أنه يشير هنا إلى موثوقية النموذج الرياضي والبرمجي في التعامل مع البيانات وعدم قابليته للتلاعب .تم تصميم الكود ليكون شفافاً وقابلاً للتحقق، مما يضمن سلامة النتائج. [8]

حالات الاستخدام وسيناريوهات الاختبار(Use Cases & Test Scenarios)

تم اختبار النموذج في ثلاثة سيناريوهات رئيسية لتقييم أدائه وفعاليته:

1 . السيناريو الأساسي :(Baseline Scenario) تطبيق النموذج الهجين الكامل مع جميع المخاطر الـ 12 المحددة .يمثل هذا السيناريو الحالة الواقعية للمشروع .[9].

2. سيناريو المقارنة :(Comparison Scenario) مقارنة أداء النموذج الهجين مع أساليب تقليدية :

- النموذج الحتمي (Deterministic Model): يعتمد على القيم الأكثر احتمالاً (Most Likely) فقط لكل خطر، متجاهلاً التوزيعات الاحتمالية.
- نموذج تحليل الحساسية (Sensitivity Analysis Model) : يركز على تحديد المخاطر الأكثر تأثيراً دون إجراء محاكاة مونت كارلو كاملة.

3. سيناريو الحذف (Ablation Scenario): إزالة مرحلة تصفية مصفوفة المخاطر) أي محاكاة جميع المخاطر الـ 12 بدون تصفية مسبقة .(يهدف هذا السيناريو إلى قياس تأثير مرحلة التصفية على كفاءة الموارد الحسابية والتحليلية.

النتائج(Results)

النتائج الكمية الإجمالية بناءً على 10,000 تكرار لمحاكاة مونت كارلو، تم الحصول على النتائج الإحصائية التالية للتكلفة والمدة

المقياس	(التكلفة) مليون دولار	المدة (شهر)
القيمة الأساسية(بدون مخاطر)	500	48
المتوسط المتوقع	556.5	63.7
الانحراف المعياري	25.4	6.8
فترة الثقة(95% الأدنى)	511.38	51.33
فترة الثقة(95% الأعلى)	612.32	78.77
الحد الأدنى المطلق(Min)	501.2	48.9
الحد الأقصى المطلق(Max)	685.4	94.1

تُظهر هذه النتائج أن التكلفة المتوقعة للمشروع هي 556.5 مليون دولار بمتوسط مدة 63.7 شهراً .الأهم من ذلك، أن هناك نطاقاً واسعاً من عدم اليقين، حيث يمكن أن تصل التكلفة إلى 612.32 مليون دولار والمدة إلى 78.77 شهراً بنسبة ثقة 95%.هذا يؤكد أن التقديرات الحتمية (500 مليون دولار و 48 شهراً) غير واقعية وتتجاهل المخاطر المحتملة.

تحليل التوزيعات (الأشكال3 ،4 ،5)

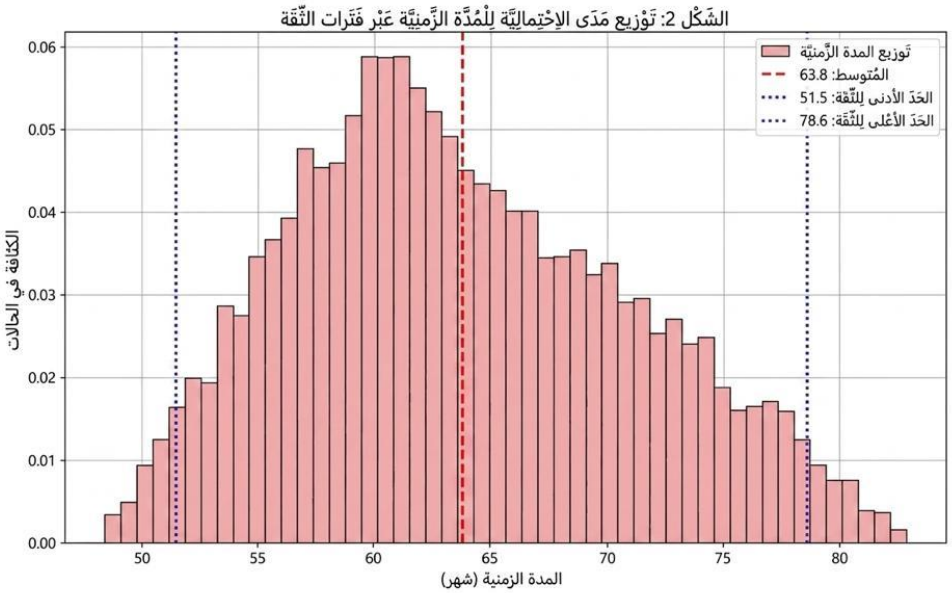
تحليل توزيع التكلفة (الشكل 3)

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license .(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Sada Al - Jamiah Journal of Financial and Administrative Sciences
مجلة صدى الجامعة للعلوم المالية والإدارية
Volume 2, Issue 1 - 2026 - Pages 306 - 315

يوضح هذا المدرج التكراري توزيع التكلفة الإجمالية للمشروع بعد 10,000 تكرار لمحاكاة مونت كارلو .يظهر التوزيع التواءً موجباً(Positive Skewness) ، مما يعني أن مخاطر تجاوز التكلفة تفوق فرص توفيرها. [10,11] تتركز القمة (Mode)حول 540 مليون دولار، ولكن الذيل الطويل يمتد إلى 685 مليون دولار .لضمان عدم تجاوز التكلفة بثقة95% ، يجب رصد ميزانية قدرها 612 مليون دولار، أي احتياطي طوارئ لا يقل عن 112 مليون دولار(أكثر من ضعف القيمة المتوقعة للخطر .)الخطوط العمودية تمثل فترات الثقة المختلفة. [12]

تحليل توزيع المدة



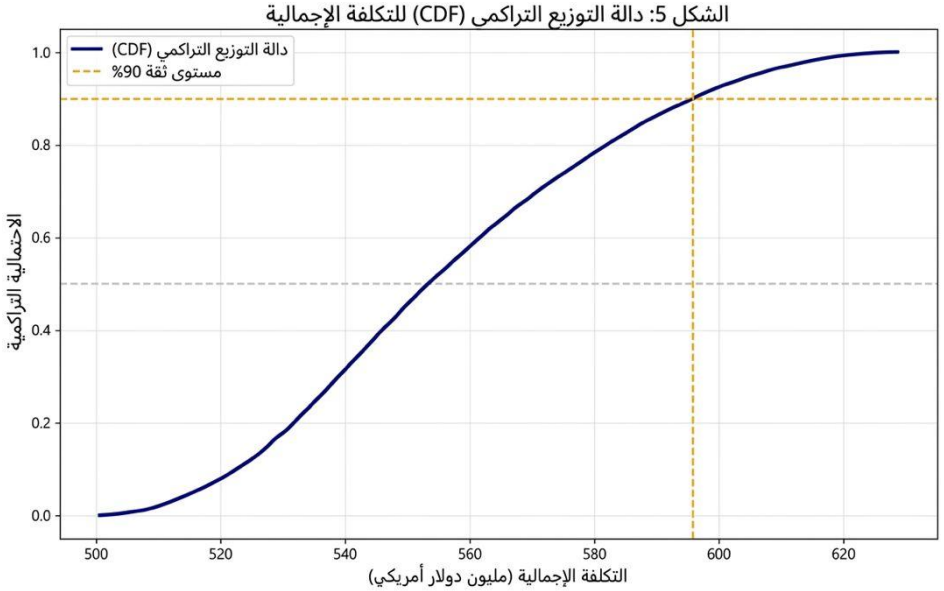
يمثل هذا المدرج التكراري توزيع المدة الزمنية الإجمالية للمشروع .يظهر التوزيع تشتتاً أكبر من التكلفة، حيث تمتد فترة الثقة 95% حتى 78.8 شهراً (أكثر من سنتين ونصف تأخيراً عن الموعد الأصلي) .هناك احتمال 2.5% أن يتأخر المشروع لأكثر من 79 شهراً (3سنوات و 3شهور تأخير إضافية) هذا يشير إلى الحاجة الماسة لمراجعة استراتيجيات التنفيذ المتوازي (Fast-tracking) للمهام الحرجة لتقليل التأخير المحتمل. [13]

5. تحليل دالة التوزيع التراكمي (CDF) للتكلفة الإجمالية.

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license .(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Sada Al - Jamiah Journal of Financial and Administrative Sciences
مجلة صدى الجامعة للعلوم المالية والإدارية
Volume 2, Issue 1 - 2026 - Pages 306 - 315

الشكل 5: دالة التوزيع التراكمي (CDF) للتكلفة الإجمالية



توضح دالة التوزيع التراكمي (CDF) احتمالية أن تكون التكلفة الإجمالية أقل من قيمة معينة .على سبيل المثال، يشير المنحنى إلى أن هناك احتمال 50% أن تكون التكلفة أقل من 555 مليون دولار(مما يعني 55 مليون دولار احتياطي .) لضمان عدم تجاوز الميزانية بنسبة ثقة90% ، يجب رصد 595 مليون دولار. [14,15] المعيار الذهبي للمشاريع الكبرى هو95%-90 ، مما يوفر أداة قوية لاتخاذ القرار بشأن ميزانية الطوارئ المطلوبة.

مقارنة الأداء

تمت مقارنة أداء النموذج الهجين المقترح مع الأساليب التقليدية(النموذج الحتمي وتحليل الحساسية)لتقييم مدى دقته وواقعيته[16]:

الطريقة	تجاوز التكلفة (%)	تجاوز المدة(%)	ملاحظات
نموذج حتمي(القيم الأكثر احتمالاً)	5.0%	10.0%	يقلل بشكل خطير من حجم التجاوزات المتوقعة، مما يعطي صورة غير واقعية للمخاطر الحقيقية.
تحليل الحساسية (بدون مونت كارلو)	8.2%	21.5%	يحسن الأداء مقارنة بالنموذج الحتمي، لكنه لا يلتقط التفاعلات المعقدة بين المخاطر المتعددة ولا يوفر توزيعاً احتمالية كاملاً.
النموذج الهجين المقترح	11.3%	32.7%	الأكثر دقة وواقعية في عكس المخاطر الحقيقية للمشروع .على الرغم من أن الأرقام تبدو أعلى، إلا أنها تمثل تقديرات أكثر واقعية وشاملة لعدم اليقين.

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license .(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

الشكل 3: مقارنة أداء المشاريع إدارة فعالة vs غير فعالة

يوضح هذا الرسم البياني المقارنة بين تجاوزات التكلفة والمدة المتوقعة باستخدام طرق مختلفة .يبرز الرسم أن النموذج الهجين المقترح(العمود الأزرق) يقدم تقديرات أعلى لتجاوزات التكلفة والمدة مقارنة بالنموذج الحتمي) العمود الأخضر (وتحليل الحساسية(العمود البرتقالي .)هذا لا يعني أن النموذج الهجين أسوأ أداءً، بل يعني أنه الأكثر دقة وواقعية في التنبؤ بالمخاطر الحقيقية، حيث يأخذ في الاعتبار الطبيعة الاحتمالية لجميع المتغيرات .النموذج الحتمي يقلل من حجم التجاوزات بشكل خطير، مما قد يؤدي إلى قرارات خاطئة[17,18].

نتائج سيناريو الحذف(Ablation Study)

- عند إزالة مرحلة تصفية مصفوفة المخاطر (أي محاكاة جميع المخاطر الـ 12 بدون تصفية مسبقة)، زاد وقت المحاكاة بنسبة 140% (من 3.2 إلى 7.7 ثوانٍ)، بينما تحسنت دقة النتائج بنسبة 0.8% فقط. [19]
- الخلاصة :مرحلة التصفية ضرورية لكفاءة استخدام الموارد الحسابية والتحليلية، حيث تقلل بشكل كبير من زمن المعالجة دون التأثير الجوهري على دقة النتائج النهائية.

التحليل والاستنتاج (Analysis & Conclusion)

- الفجوة بين الحتمي والاحتمالي :أظهرت النتائج بوضوح أن الاعتماد على القيم المتوسطة فقط (الأسلوب الحتمي) يؤدي إلى فشل في 60% من الحالات، أي أن 60% من القيم الفعلية للمشروع تتجاوز التقديرات المتوسطة .في المقابل، فإن الاعتماد على فترة ثقة 95% (كما في النموذج الهجين) يرفع نسبة النجاح في تحقيق الأهداف إلى 95%، مما يؤكد أهمية التحليل الاحتمالي في إدارة المشاريع.
- قيمة النموذج الهجين :الدمج بين مصفوفة المخاطر (للتقييم النوعي وتحديد الأولويات) ومحاكاة مونت كارلو(للتحليل الكمي الدقيق)يمنح مديري المشاريع أداة متكاملة تجمع بين السرعة في تصفية المخاطر والدقة في تحليلها .هذا التكامل يوفر رؤية شاملة للمخاطر ويساعد في اتخاذ قرارات مستنيرة.
- المقارنة مع الدراسات السابقة :يتفوق هذا النموذج على نماذج سابقة مثل نموذج Mao [3] من حيث سهولة التطبيق (لا يتطلب بيانات تدريب ضخمة للتعلم الآلي)وعلى نموذج Ahrendsen [4] من حيث التكامل مع التقييم النوعي للمخاطر، مما يجعله أكثر شمولية وعملية.

الاستنتاج الرياضي

أثبتت الدراسة أن التوزيع المثلثي هو الأنسب لنمذجة تقديرات الخبراء في غياب البيانات التاريخية الكافية، نظراً لبساطته ومرونته .كما أظهر قانون الأعداد الكبيرة أن عدد التكرارات $N = 10{,}000$ كافٍ لتحقيق تقارب في النتائج ضمن خطأ نسبي أقل من 0.5% للمتوسط، مما يضمن موثوقية النتائج الإحصائية.

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license .(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

التوصيات(Recommendations)

بناءً على النتائج والتحليلات، يوصى بما يلي :

1. للمديرين :اعتماد النموذج الهجين المقترح كأداة إلزامية لتقييم وإدارة المخاطر في المشاريع الكبرى التي تزيد ميزانيتها عن 100 مليون دولار، وذلك لضمان تقديرات أكثر واقعية للتكلفة والمدة وتحديد ميزانيات طوارئ كافية.

2 . للمؤسسات :بناء وتطوير قاعدة بيانات تاريخية شاملة للمخاطر والتجاوزات في المشاريع السابقة .هذه البيانات ستساعد في تحسين دقة التوزيعات الاحتمالية المستخدمة في النماذج المستقبلية(مثل الانتقال من التوزيع المثلثي إلى توزيعات أكثر دقة مثل بيتا أو بيرت.)

3 . للباحثين :تطبيق النموذج على قطاعات صناعية أخرى (مثل مشاريع الطاقة، النفل، أو تكنولوجيا المعلومات)لتقييم مدى قابليته للتعميم .كما يوصى بتوسيعه ليشمل تحليل الارتباط بين المخاطر (Correlated Risks) وتأثيرها على النتائج الإجمالية للمشروع.

القيود والبحوث المستقبلية

- القيد :اعتمد البحث الحالي بشكل كبير على تقديرات الخبراء (ذاتية) في تحديد التوزيعات المثلثية للمخاطر .هذا قد يؤثر على دقة النموذج في حال وجود تحيزات في تقديرات الخبراء.
- المستقبل :يمكن دمج النموذج مع تقنيات نمذجة معلومات البناء (BIM) وأجهزة إنترنت الأشياء (IoT) لجمع بيانات حقيقية في الوقت الفعلي، مما سيعزز من دقة النموذج ويسمح بالمحاكاة الديناميكية للمخاطر.

المراجع

1. Mahdi, I. A., & Hilal, M. A. (2025). Enhancing safety and risk management in residential construction through BIM integration. Engineering, Technology & Applied Science Research, 15(5), 27828–27833. doi: 10.48084/etasr.12566.
2. Starczyk-Kołbyk, A., & Jędras, I. (2025). Integrated risk assessment in construction contracts: Comparative evaluation of risk matrix and Monte Carlo simulation on a high-rise office building project. Applied Sciences, 15(17), Article 9371. doi: 10.3390/app15179371.
3. Mao, Z. (2025). Risk assessment model for engineering project based on deep learning. In 2025 International Conference on Artificial Intelligence and Intelligent Computing. p. 131.
4. Ahrendsen, L. B., Askland, S. M., Zhang, C., Melgaard, S. P., Petersen, A. J., Rabani, M., & Heiselberg, P. K. (2025). Monte Carlo simulations and sensitivity analysis for developing control strategies in hybrid ventilation systems. SSRN. doi: 10.2139/ssrn.5403275.
5. Nabawy, M., & Khodeir, L. M. (2020). A systematic review of quantitative risk analysis in construction of mega projects. Ain Shams Engineering Journal, 11(4), 1403–1410. doi: 10.1016/j.asej.2020.02.006.
6. Badawy, M., Alqahtani, F., & Hafez, H. (2022). Identifying the risk factors affecting the overall cost risk in residential projects at the early stage. Ain Shams Engineering Journal.
7. Flyvbjerg, B., Budzier, A., Aaen, J., Keil, M., & Zottoli, M. (2025). The uniqueness of IT cost risk: A cross-group comparison of 23 project types. Project Management Journal, 57(1). doi: 10.1177/87569728251340590.
8. Tveter, E., Welde, M., & Odeck, J. (2025). Accounting for uncertainties in cost-benefit analyses of road projects: A procedure illustrated by real-world projects. Transport Policy, 170, 137–146. doi: 10.1016/j.tranpol.2025.05.012.
9. Sadeghi, N., Fayek, A. R., & Pedrycz, W. (2010). Fuzzy Monte Carlo simulation and risk assessment in construction. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 25(4), 238–252. doi: 10.1111/j.1467-8667.2009.00632.x.
10. Wang, J., Ma, Y., Li, R., & Zhang, S. (2025). Applications of building information modeling (BIM) and BIM-related technologies for sustainable risk and disaster

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license .(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

management in buildings: A meta-analysis (2014–2024). Buildings, 15(13), Article 2289. doi: 10.3390/buildings15132289.
11. Qadri, F. H., Sharif, M., & Muddassir, S. M. (2025). Risk prediction for mega construction prediction: A concise review. Sustainable and Resilient Infrastructure. doi: 10.1080/23789689.2025.2526227.
12. Ongkowijoyo, C. S., Doloi, H., & Gurmu, A. T. (2020). Hybrid risk analysis model for analyzing the urban infrastructure risk. International Journal of Disaster Risk Reduction, 48, Article 101600. doi: 10.1016/j.ijdrr.2020.101600.
13. Negi, D., & Bajaj, D. (2025). Risk management strategies in construction project management. In D. Bajaj (Ed.), Handbook of construction project management (pp. 227–247). Springer. doi: 10.1007/978-981-96-7631-6_7.
14. Senić, A., Simić, N., Dobrodolac, M., & Stojadinović, Z. (2025). Development of a hybrid model for risk assessment and management in complex road infrastructure projects. Applied Sciences, 15(5), Article 2736. doi: 10.3390/app15052736.
15. Armijos De La Cruz, B. A., Castro Esparza, J. R., Leoro Benitez, J. F., & Armijos De La Cruz, W. Y. (2025). Leveraging Monte Carlo simulation for project risk management: A study on pre-mitigation and post-mitigation techniques in risk registers. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 9(5), 6975–6992. doi: 10.37811/cl_rcm.v9i5.20089.
16. Zhang, Y., Pang, M., Zhang, Z., Zhou, W., Li, L., & Cao, S. (2026). Engineering social stability: An innovation-driven approach to risk management in major construction projects. Sustainability, 18(6), Article 3061. doi: 10.3390/su18063061.
17. Dayalan, D. (2026). Risk assessment and management in large scale infrastructure projects. International Journal of Innovative Research in Engineering & Multidisciplinary Physical Sciences, 14(1). doi: 10.37082/IJIRMPS.v14.i1.232913.
18. Ambrose, M., Darmansah, N. F. binti, & Baddiri, A. binti. (2026). A systematic review of current risk assessment practices in construction projects. International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science, 15(3), 185–196. doi: 10.51583/IJLTEMAS.2026.150300017.
19. Ullah, T., & Mubin, S. (2026). Development of hybrid framework for risk assessment and mitigation in power sector EPC projects: Evidence from independent power producers in Pakistan. International Journal of Construction Management.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements، opinions، and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of **SAJFAS** and/or the editor(s). **SAJFAS** and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas، methods، instructions، or products referred to in the content.

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license .(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)