

تكامل الذكاء الاصطناعي والمشاركة المجتمعية: إطار عمل هجين لتعزيز مرونة المدن الهشة (تعز، اليمن) في مواجهة الفيضانات.

¹ أديب ابراهيم , جامعة عمران، اليمن

*Corresponding author: adeebebrahim4@gmail.com

Received: 29 November 2025

Accepted: 24 Feb 2026

Published: 15 March 2026

المخلص

تناقش هذه الدراسة الفيضانات الحضرية في مدينة تعز بوصفها نتاج تفاعل المناخ القاسي مع الصراع وضعف الإدارة والفقر المتجذر. تعاني مدينة تعز من شحة بيانات وتجزئة مؤسسية، ما يجعل الأساليب التقليدية غير فعالة اجتماعيا واقتصاديا. وبالتالي، تسعى الدراسة الى معالجة فجوات معرفية وتطبيقية عبر إطار متكامل يجمع التحليل التنبؤي مع تدخلات مجتمعية ميدانية. وقد اعتمدت المنهجية على تقدير مخاطر الفيضانات حتى 2030 باستخدام نموذج SCS-CN، ونماذج تعلم آلي تشمل Random forest و ARIMA مع تحليل جغرافي مكاني عبر منصة Google earth engine وبيانات Sentinel-1 للفترة 2015 إلى 2024. أظهرت النتائج أن 40% من مساحة تعز قد تواجه مخاطر عالية بحلول 2050، مع زيادة شدة الأمطار بنسبة 20 إلى 30%. خفضت مبادرات مجتمعية لإصلاح الصرف وتكرار الفيضانات 35%، وحسنت مستشعرات IoT زمن الاستجابة 60%. وتؤكد الدراسة أهمية نماذج قابلة للتوسع تجمع التقنية منخفضة التكلفة مع الحوكمة التشاركية، وتدعو لإعادة توجيه التمويل الدولي لدعم هذه المقاربات القائمة على البيانات الفعلية.

الكلمات المفتاحية: المرونة الهجينة، الذكاء الاصطناعي التنبؤي، الحوكمة التشاركية، إنترنت الأشياء (IoT)، الاستشعار عن بعد.

1. المقدمة

• تأطير تحدي المرونة في المدن الهشة.

تشير العديد من الدراسات إلى أن ظاهرة الفيضانات الحضرية تمثل تحديا أساسيا في المدن التي تعصف بها الصراعات، والتي يشار إليها غالبا بـ "المدن الهشة (Fragile cities) تحديا بيئيا واجتماعيا متفاعلا على مستوى العالم [1]. وتعد هذه الظاهرة مركبة تتشابه فيها التأثيرات المتطرفة للتغير المناخي مع النزاعات الجيوسياسية، وقصور الحوكمة المؤسسية، والفقر الهيكلي المتجذر، الأمر الذي يضاعف من هشاشة المجتمعات الحضرية [2, 3]. وفي ضوء ذلك، تشير الدراسة، إلى إنه في سياقات مثل مدينة تعز اليمنية، حيث تتسبب سنوات الصراع في تدهور البنية التحتية الحيوية، بحيث يقدر أن 80% من شبكات الصرف الصحي متضررة، الأمر الذي أدى إلى نزوح سنوي لأكثر من 45,000 نسمة بسبب تكرار ظاهرة الفيضانات [4]. ومن صعيد آخر، في مثل هذه البيئات، تصبح المناهج التقليدية لإدارة الكوارث، التي تعتمد على القرارات

المركزية (Top-down) والحلول الهندسية البحتة، غير مجدية عمليا على الصعيدين الاجتماعي والمالي، وتقتل في بناء مرونة مستدامة [5].

وفي ذات السياق المحلي، تنطلق هذه الدراسة من فرضية جوهرية مفادها: أن المرونة في بيئات الصراع يمكن أن تؤدي لاستثمارات رأسمالية ضخمة في البنية التحتية، ويجب أن تكون هناك عملية تطوير مشتركة (Co-developed)، و توطين للمخاطر تعتمد على أنظمة متعددة. بحيث يدمج هذا النموذج بين التقنيات التنبؤية المتقدمة (كالذكاء الاصطناعي والاستشعار عن بعد)، والقدرة الفاعلة للمجتمع المحلي (Community agency). بالإضافة لذلك، يهدف هذا التوجه إلى تمكين السكان الأكثر عرضة للخطر ليصبحوا صناعا لمصيرهم وشركاء في الحل والقرار، وليسوا مجرد متلقين للمساعدات الإنسانية المؤقتة. ولتوظيف هذا المبحث، تضع هذه الدراسة مدينة تعز في صميم النقاش الأكاديمي والعملية حول كيفية صمود المدن الهشة في ظل مؤشر الاضطراب وعدم اليقين المناخي، وتسعى لتقديم نموذجا لإعادة هيكلة أنظمة إدارة المخاطر التي تجذر لمخاطر متضاعفة باستمرار.

1.1. فجوة البحث والإسهام العلمي:

تشير العديد من الدراسات، على الرغم من التقدم الكبير في استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي، وإنترنت الأشياء (IoT)، لتعزيز مرونة الفيضانات في المدن المستقرة مثل هولندا [6]، إلا أن تطبيق هذه النماذج في السياقات الغير مستقرة مثل مدينة تعز تواجه تحديات غير مسبوقه وفريده، لعلنا، أبرزها ندرة البيانات، وتجزئة أنظمة الحوكمة، والافتقار إلى الثقة بين المجتمع والسلطات المحلية [7]. إن النماذج المركزية التقليدية تقتل في معالجة هذا التفاعل المتداخل بين الديناميكيات المؤسسية والاجتماعية والمناخية [8]. وحتى تتضح الرؤية بشكل اعمق، تسهم هذه الدراسة في سد فجوة بحثية حرجة من خلال تقديم إطار عمل هجين يظهر كيف يمكن للقدرة المحلية والتكنولوجيا القابلة للتوسع أن تسد فجوة التكيف في عملية التنبؤ في الفيضانات المستقبلية. وقد تم تطبيق هذا الإطار في تعز، اليمن، مع مقارنات حالة من غزة ومقديشو، لتقديم دليل تجريبي على فاعليته في بيئات ذات السياق.

2.1. الإسهامات والاهداف العلمية الرئيسية:

بناءا على ما سبق، يمكن الإشارة إلى بعض الإسهامات التي تسعى لها هذه الدراسة من خلال التالي:

1. التأسيس لدليل تجريبي للمرونة الهجينة: من خلال تقديم أول دليل تجريبي موثق على فاعلية الإدارة الهجينة للفيضانات (التقنية-المجتمعية) في بيئة أزمات نشطة، حيث أظهرت النتائج خفضا في تكرار الفيضانات بنسبة 35% وتسريعا في زمن الاستجابة للطوارئ بنسبة 60%.

2. معالجة فجوة البيانات عبر الخرائط عالية الدقة: استخدام النمذجة الهيدرولوجية (SCS-CN) بالاشتراك مع التعلم الآلي Random forest و ARIMA والتحليل الجغرافي المكاني SAR Google Earth Engine Sentinel-1، وذلك، لإنتاج خرائط مخاطر عالية الدقة لمدينة تعز، الأمر الذي لربما يعالج النقص الحاد في البيانات الموثوقة في مناطق الأزمات.

3. تطوير أطر سياسات قابلة للتوسع وحساسة للوضع الحالي: صياغة نموذج عملي يدمج الحوكمة التشاركية والحلول منخفضة التكلفة، الأمر الذي يدعم متطلبات إطار سندي للحد من مخاطر الكوارث [9]، ويمهد الطريق لانتقال قابل للتوسع من المساعدات الإنسانية التفاعلية إلى الحوكمة الاستباقية في دول الجنوب العالمي مثل مدينة تعز. ونتيجة لما تم ذكره آنفاً، تقدم هذه الدراسة نموذجاً قابلاً للتكرار لمرونة الفيضانات في البيئات الحضرية الهشة، بتحويل الفئات الضعيفة من ضحايا للكوارث إلى مصممين لبقائهم، مما يفعل مبدأ العدالة التوزيعية في إدارة مخاطر الفيضانات.

2. مراجعة الأدبيات:

• سد الفجوة بين الابتكار العلمي والتطبيق الاجتماعي:

تشير الدراسات إلى دور التقنيات التنبؤية، مثل شبكات إنترنت الأشياء، والنماذج الهيدرولوجية المدعومة بالذكاء الاصطناعي، في خفض احتمالية الفيضانات في المدن الكبرى المستقرة بدقة تنبؤ تصل إلى 92% [8]. ورغم ذلك، تقدم هذه التقنيات حلولاً طيفية في المدن التي تعصف بها الأزمات وتتسم بالتوسع الحضري السريع والعشوائي. وبناء على ذلك، يشير تقييم الوضع الراهن إن أنظمة الصرف الصحي المتضررة تؤدي إلى مزيد من النزوح [9]، وتتجاهل النماذج المركزية الانهيار المؤسسي [10]، وتحمل النساء 70% من عبء النزوح [11]، وكل ذلك يعيق تبني هذه التقنيات. وبناء على جميع المعطيات السابقة، تساهم هذه الدراسة في سد فجوة جوهرية تتمثل في ندرة الأطر التي تدعم المرونة حيث تزيد الحاجة إليها-في هشاشة تعز وغزة ومقدشو-من خلال الاستفادة من القدرة المجتمعية، والتحليلات الجغرافية المكانية (رادار SAR Sentinel-1 ومحرك جوجل إيرث). يبدأ أنه، في هذه الدراسة يشار إلى أن 60% من أنظمة الصرف الصحي في مناطق الحرب مدمرة، الأمر الذي ساهم بشكل حاد من النزوح والمخاوف الصحية العامة، كما يتضح من نزوح أكثر من 45,000 من سكان تعز سنوياً بعد الفيضانات [4]. ويعد أحد أهم التحديات الحاسمة: الفجوة بين تحديات التطبيق الاجتماعي والابتكار العلمي.

وعلى الرغم من أن المراقبة عالية الدقة للفيضانات ممكنة باستخدام التقنيات الجغرافية المكانية المتطورة [12]، يبدأ أن استخدامها في مناطق الصراع غالباً ما يفشل بالاعتماد على النماذج الهيدرولوجية التقليدية والافتقار إلى التصميم التشاركي [10]. تعطي النماذج المركزية التقليدية الأولوية للبنية التحتية وتتجاهل التفاعل المعقد بين الديناميكيات المؤسسية والاجتماعية والمناخية [13]. على سبيل المثال، أنظمة التوأم الرقمي في روتردام، رغم نجاحها الباهر في الظروف المستقرة، غير أنها، ليست ذات جدوى مالياً أو سياسياً في مدن مثل مقدشو، حيث 90% من المرافق الأساسية فقدت وظيفتها [14].

تستند المنهجية المطورة في هذه الدراسة إلى بناء تراكمي للأدبيات، حيث تستخدم بيانات IMERG/GPM لمحاكاة هطول الأمطار وبيانات SAR Sentinel-1 للتحقق من الغمر، مع تطبيق مخطط SCS-CN باستخدام معاملات مشتقة من قواعد بيانات عالمية (مجموعات التربة، ESA CCI لاستخدام الأراضي، دليل USDA لجدول CN) ونسبة نفاذية 35% و $\lambda=0.2$ للاحتجاز الأولي في محاكاة تراكمية سنوية، مما يعالج فجوة التطبيق في سياقات المدن الهشة ذات

البيانات المحدودة مثل مدينة تعز. وفي النهاية، يركز البحث المتقدم على الأطر الهجينة التي تدمج التحليلات التنبؤية والحوكمة التشاركية.

ومن جانب آخر، تشير الأبحاث التي أجريت في غزة وبورت أو برنس إلى أن البيانات المجمعة من الجمهور وأجهزة إنترنت الأشياء منخفضة التكلفة يمكن أن تعزز الاستجابة في الوقت الفعلي في السياقات محدودة الموارد [15]. ومع ذلك، لا تزال هناك فجوات بحثية أخرى خاصة لمدينة تعز مثل:

1. نقص خرائط المخاطر عالية الدقة لمناطق الصراع، وبالتالي يشجع على السياسات التفاعلية بدلا من الاستباقية.
2. عدم التقدير الكمي الدقيق لنسب تحليل التكلفة والمنفعة للتدخلات التي يقودها المجتمع (مثل إعادة تأهيل الصرف الصحي) مقابل الأساليب التقليدية.
3. تجاهل الاستراتيجيات الشاملة للنوع الاجتماعي، على الرغم من أن النساء يشكلن 70% من النازحين في المناطق المعرضة للفيضانات [11].

وعلى ضوء ما سبق، تقترح هذه الدراسة نظاما يجمع بين نمذجة نظم المعلومات الجغرافية (النهج الهيدرولوجي SCS-CN)، والمراقبة المدعومة بإنترنت الأشياء، والمشاريع التي يقودها المجتمع والتي ثبتت فعاليتها تجريبيا في تعز-لسد هذه الفجوات. ومن خلال المنهج المقارن فقد أشارت النتائج ضمن دراسات حالة مقارنة (غزة ومقديشو)، واستقراء النجاح والفشل تخوف هذه الدراسة لتطوير منهجا للمرونة قابلة للتوسع وملئمة للصراع، وتتوافق مع متطلبات إطار سندي للحوكمة الشاملة للكوارث [7].

وحتى تتضح الرؤية بشكل اعمق، فقد أظهرت النتائج التجريبية في تعز فعالية هذا النهج، مع انخفاض في الفيضانات بنسبة 35% وتسريع في زمن الاستجابة للطوارئ بنسبة 60%. الأمر الذي يمكن من تحسين لإدارة الكوارث، وبالتالي تفعيل للعدالة التوزيعية. وذلك من خلال توطيد دعوة إطار سندي للحوكمة الشاملة، يحول نهجنا السكان الأصليين من مجرد كونهم أدوات ثانوية إلى مهندسين مشاركين في البقاء وصنع القرار [7].

وفي النهاية، يقدم هذا الإطار استراتيجيات قابلة للتوسع لتوليد حلقة المساعدات التفاعلية في الجنوب العالمي. وانطلاقا من هذه الفجوة المفاهيمية، ينتقل البحث إلى تصميم منهجية سباعية تترجم النظرية إلى ممارسة تطبيقية.

3. منهجية البحث

تعتمد الدراسة على منهجية متعددة تجمع بين التقنيات الجغرافية المكانية المتقدمة، والتعلم الآلي، وأنظمة الحوكمة التشاركية، المصممة خصيصا للمدن الحضرية المتضررة من الأزمات. فعلى سبيل المثال، بدلا من النماذج الهيدرولوجية التقليدية الثابتة والمنفصلة عن الواقع، يطبق هذا المنهج حلقة تغذية راجعة ديناميكية بين الإنسان والذكاء الاصطناعي: حيث تعيد المدخلات المجتمعية عبر تدفقات البيانات معايرة النماذج في الوقت الفعلي، وتملأ مستشعرات إنترنت الأشياء منخفضة التكلفة الفجوة بين المحاكاة الفضائية والواقع الميداني. بتوجيه من معايير التصميم الأخلاقي-الشمولية المتوازنة بين الجنسين،

والموافقة النيرة، وأخذ العينات الملائمة لبيئات الصراع-تعزز هذه المنهجية دقة التنبؤ، وتبني المرونة في نسيج المجتمع الذي تهدف إلى حمايته. وعلى ضوء ما سبق، فقد أسس البحث مخططا شاملا لمرونة الفيضانات الحضرية، وهو مخطط مناسب علميا، ومدمج اجتماعيا، وملائم للسياسات الهشة. انظر إلى الشكل ١، الذي يوضح تسلسل مراحل المنهجية والتي يمكن تلخيصها من خلال الخطوات التالية >

1.3. ملخص إطار المنهجية.

بناء على المعطيات السابقة، يشمل هذا الإطار المختلط المبتكر التحليلات الجغرافية المكانية، والتدخلات المجتمعية في الوقت الفعلي، ونماذج التنبؤ بالفيضانات القائمة على التعلم الآلي. وقد تم تطويره خصيصا للبيئات الحضرية المتأثرة بالأزمات، ويدعم من على القدرة على التكيف، والشمول، وقابلية التطبيق في مواجهة هشاشة الحكومات، وانهيار البنية التحتية، وشرح البيانات. وتشكل الركائز الأربع التالية أساس النموذج الهجين:

- النمذجة الهيدرولوجية المدعومة بالذكاء الاصطناعي.
- استخدام أنظمة الإنذار والمراقبة المبكرة المدعومة بإنترنترنت الأشياء، وبيانات الأقمار الصناعية لرسم خرائط المخاطر الجغرافية بدقة.
- تطبيق وتفعيل الحوكمة التشاركية لمعالجة القضايا على المستوى الشعبي.
- المنهج التشاركي وإشراك السكان الأصليين في التخطيط وصناعة القرار. ويهدف كل مكون إلى معالجة القيود المنهجية في المدن الهشة لتطوير استراتيجيات قابلة للتوسع والتكرار. انظر الجدول ١ الذي يوضح أدوات وتفاصيل هذه الركائز.

2.3. خطوات التنفيذ:

الخطوة 1: الموقع الجغرافي والتصميم الأخلاقي.

- موقع الدراسة: استهدفت هذه الدراسة مدينة تعز، اليمن بموقع الجغرافي (E°43.90-13.55°44.00-N°E, 13.65°N).
- القضايا الأخلاقية: إن هذه الدراسة تتفق هذه الدراسة مع برنامج الأمم المتحدة الإنمائي (UNDP) والمجلس المحلي.
- المشاركة العادلة بين الجنسين: شملت الدراسة عينية متنوعة من كلا الجنسين من السكان الأصليين بحيث ان ٥٠% من عينية الدراسة من الأسر التي ترأسها نساء.
- الاستبعاد: وبسبب الأوضاع والظروف الأمنية فقد استبعدت المواقع ذات الصراع العالي وايضا السكان الذين لا يرغبون في المشاركة او الموافقة.
- العينة: شملت الدراسة الميدانية ٢٠٠، ١ أسرة من السكان الأصليين المقيمة في المواقع المعرضة للفيضانات لأكثر من 12 شهرا.

الخطوة 2: تطبيق النمذجة الهيدرولوجية والتنبؤ باتجاهات هطول الأمطار.

- النموذج المستخدم: وفقا لهدف البحث تقترح الدراسة تطبيق لتقنية رقم المنحنى لخدمة حفظ التربة (SCS-CN) لأحواض الصرف الحضرية.
- التحقق من البيانات: ولهدف الوصول إلى نتائج واقعية تم إجراء رادار SAR Sentinel-1 لتأكيد وحساب مجموعة بيانات هطول الأمطار (IMERG v 06, NASA, 2022) للفترة من 2015 إلى 2024.
- طرق التنبؤ: تم تطبيق واستخدام الانحدار الذاتي والمتوسط المتحرك المتكامل (ARIMA) والغابات العشوائية لحساب ومحاكاة حقيقة لكمية السيول في هذه الفترة.
- معايير التحقق: سعت الدراسة وتحرت الدقة إلى أن يكون جذر متوسط مربع الخطأ (RMSE) أقل من 10%، ومعامل التحديد (R^2) يساوي 0.82. وذلك ليكون متوافق مع التجارب العالمية السابقة مثل غزه ومقديشوا.
- طرق التنبؤ: تم تطبيق نموذج الانحدار الذاتي والمتوسط المتحرك المتكامل (ARIMA) لتحليل الاتجاهات التاريخية لهطول الأمطار، بينما استندت التنبؤات المناخية طويلة المدى (حتى 2030 و 2050) على مجموعة من النماذج المناخية العالمية من مشروع CMIP 6 تحت سيناريوهات SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بعد إخضاعها لعملية التدرج النطاقي الإحصائي.
- الخطوة 3: رسم خرائط المخاطر الجغرافية وتحليل التضاريس.
- الأدوات: محرك جوجل إيرث (GEE) و Sentinel-1)، ونموذج الارتفاع الرقمي (SRTM DEM).
- المحاكاة: محاكاة هيدرولوجية مدعومة بالذكاء الاصطناعي.
- عوامل الخطر: دراسة وحساب المؤشرات المساهمة في حساب مخاطر السيول بدقة مثل فقدان الغطاء النباتي (مؤشر فرق الغطاء النباتي الطبيعي (NDVI)، الانحدار ($< 5^\circ$)، والارتفاع (> 1500 م).
- النتائج: الوصول إلى خرائط مخاطر فيضانات متعددة المعايير عالية الدقة (10-30 م) لعام 2025 والمتوقعة ل 2035/2030. صنفت المناطق إلى مخاطر منخفضة ومتوسطة وعالية باستخدام معايير شرطية وأوزان ترجيحية وفقا لأهمية كل مؤشر.
- الخطوة 4: تطبيق مستشعرات إنترنت الأشياء والتدخلات المجتمعية.
- المستشعرات مواصفات نظام المراقبة: تم نشر 15 وحدة استشعار بتكلفة مناسبة بسعر 15 دولارا مناسبة للوضع تعمل بالموجات فوق الصوتية (موديل: A02YYUW، مداها 0.3-3.5م بدقة ± 1 سم مع تعويض حراري مدمج. تم تركيبها على ارتفاع ثابت (1.5 م) فوق قاع المجاري. تعمل ببطاريات ليثيوم (10,000mAh) مع ألواح شمسية صغيرة W(5) وتتواصل بلوحة LoRaWAN إلى بوابة مركزية. بلغ معدل اكتمال البيانات الشهري $\pm 92.4\%$ ± 5.1% خلال 12 شهراً، مع معايرة دورية كل 4 أشهر مع مسطرة معيارية.
- العمل المجتمعي: نسق هذا البحث مع المجالس المحلية مشروعا لإعادة تأهيل الصرف الصحي كثيف العمالة كل أسبوعين.
- الامتثال: معدل امتثال لمدة 12 شهرا بنسبة 85%.

- دمج آليات التغذية الراجعة: لتحقيق منهجية البحث تم استخدام الذكاء الاصطناعي الإنسان في الحلقة (Human-in-the-loop AI): إعادة معايرة نموذج محاكاة الجريان السطحي ببيانات المستشعرات في الوقت الفعلي والمسوحات القابلة للنقل التي تجرى كل أسبوعين.
- الابتكار: حلقات تغذية راجعة محلية تكرارية مقترنة بأطر التعلم الآلي.
- قوة الإحصاء: $\alpha = 0.05$, $\beta = 0.2$, $1,200 =$ تقدير الأثر السببي للتدخلات، استخدم تحليل الفروق في الفروق (Difference-in-differences) بمقارنة التغير في مؤشران تكرر الفيضانات ووقت الاستجابة بين أحياء التدخل وأحياء تحكم عملية مطابقة، مع التحكم الإحصائي في مجموع الهطول الموسمي والشدة القصوى للأمطار كمتغيرات مصاحبة ومؤثره في عملية الحساب.
- **3.3. التدخلات والإجراءات والمؤشرات المستخدمة:**
تم حساب مجموعة من المؤشرات الحسابية تمثلت بالتالي:
- تكرار الفيضانات (حدث/سنة): عدد الأحداث السنوية التي يسجل فيها ارتفاع منسوب المياه في قنوات الصرف ≥ 30 سم بواسطة مستشعرات IoT، وأما تم الإبلاغ عنها مجتمعياً كأحداث تسبب في دخول المياه للمنازل.
- وقت الاستجابة: المدة الزمنية (بالساعات) من إصدار النظام انذاراً آلياً إلى فريق الاستجابة المجتمعية المدرب إلى وصول نقطة التجمع المحددة مسبقاً.
- عمق الجريان السطحي (سم).
- الالتزام المجتمعي.
- **4.3. معالجة قابلية الاستنساخ وشفافية البيانات:**
في هذا السياق، التزمت الاستراتيجية بمبادئ بيانات FAIR ومعايير إطار سندي للحد من مخاطر الكوارث [7]. تشير هذه المنهجية إلى العديد من التطورات الهامة التي لم تدرج في الأطر الحالية لمرونة الفيضانات:
- الجمع بين الذكاء الاصطناعي، والخدمة المجتمعية، والحساسية للصراع. ولعله من المناسب القول أن هذه الدراسة تعد هي الأولى من نوعها التي تحاول أن تفعل التنبؤ بالفيضانات المدعوم بالذكاء الاصطناعي في سياق وبيئات الصراع مثل مدينة تعز، مع دمج آليات التغذية الراجعة المجتمعية في الوقت الآني (اللحظي).
- النموذج الهجين القابل للتوسع. يثبت هذا النموذج أنه يمكن تحقيق مرونة فعالة من حيث التكلفة في المدن الهشة، مقارنة بالأساليب التقليدية باهظة الثمن وغير قابلة للتطبيق
- العدالة التوزيعية في البيانات: من خلال إتاحة جميع البيانات والبروتوكولات، تعزز الدراسة الشفافية وقابلية الاستنساخ، مما يمكن المجتمعات الأخرى من تكييف هذا الإطار. ويتضمن: مجموعة اكواد GEE جاهزة للتنفيذ، شيفرة ML منسقة (Python/R)، ملفات التهيئة، وقاموس البيانات الذي يوضح التعامل مع القيم الفارغة والتحويلات.

5.3 تحليل الحساسية وعدم اليقين:

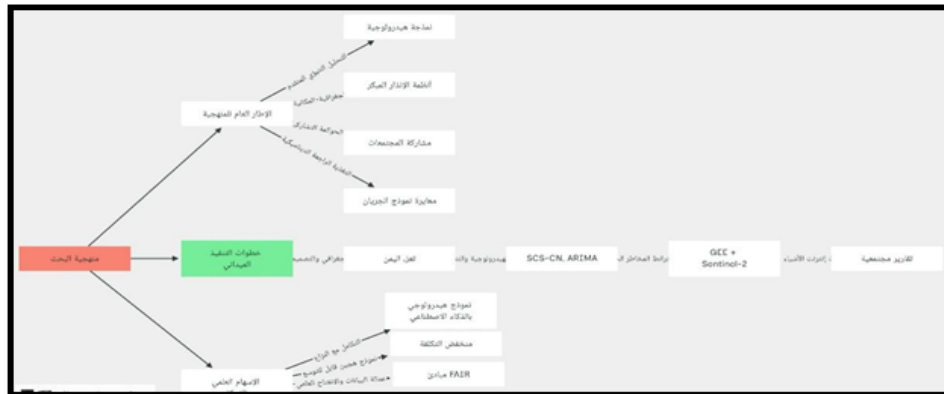
يصف استخدام تحليل حساسية السياق عن طريق اداة (مونت كارلو)، وذلك لتقييم تأثير تغيرات (10% CN ±)، مع الاخذ بالاعتبار عوامل أخطاء الأمطار واطفاء نموذج الارتفاع الرقمي DEM على المخرجات. تم تعديل النسب لتشمل هوامش خطأ : بمقدار 40% ± 3% من المنطقة المعرضة للخطر، ومعدل انخفاض 35% ± 4% ايضا في عملية تكرار الحدوث.

الجدول 1: الركائز الأربع لإطار الابتكار الهجين.

الهدف الإبداعي والتطبيقي	المكوّن التقني / الاجتماعي	الركيزة
التحليل التنبؤي المتقدم	النمذجة الهيدرولوجية المعززة بالذكاء الاصطناعي (SCS-CN RF ARIMA).	تجاوز القيود التقليدية للنماذج الهيدرولوجية من خلال تقديم تنبؤات دقيقة قصيرة ومتوسطة المدى (2030 / 2035)، بما يعزز الاستجابة الاستباقية للظواهر المناخية.
المراقبة الجغرافية-المكانية والميدانية	أنظمة الإنذار المبكر المدعومة بإنترنت الصناعية الأشياء (IoT) وبيانات الأقمار (Sentinel-1 SAR GEE).	سد فجوة البيانات الزمنية والمكانية عبر مستشعرات منخفضة التكلفة وإنشاء خرائط مخاطر عالية الدقة (10 م) في تعزيز المرونة المناخية.
الحوكمة التشاركية	اعتماد النهج التشاركي وإشراك المجتمعات المحلية والسكان الأصليين في عمليات التخطيط والتدخل.	تحويل السكان من عينية متلقية للمساعدات إلى شركاء فاعلين في إدارة المخاطر وصناعة القرار، بما يدعم الملكية المحلية والاستدامة الاجتماعية..
*تمت موافقة الدراسة مع المعايير الأخلاقية عبر موافقة مستنيرة مسجلة وإخفاء هوية البيانات الحساسة. لضمان الشفافية وإمكانية التكرار، تم إتاحة جميع النصوص البرمجية (GEE، Python) وملفات التهيئة وقواميس البيانات عبر مستودع عام وفقاً لمبادئ FAIR (مع استثناء البيانات ذات الحساسية الأمنية).		

يشكل إطار العمل الهجين ابتكاراً منهجياً يركز على القدرة على التكيف، والشمول، وقابلية الاستنساخ في بيئات الأزمات. وتبنى المنهجية على أربع ركائز متكاملة:

يلخص الجدول بشكل عام الأربعة الركائز التي اعتمدت عليها منهجية البحث والهدف والاسهام العلمي لكل ركيزة .



شكل 1: منهجية البحث ومراحلها وأخواتها. عمل الباحث.

4. النتائج والمستكشفات:

وبعد استعراض الإطار النظري والمنهجي، تأتي النتائج لتبرهن فاعلية هذا الإطار في واقع مدينة تعز القديمة. في ضوء المنهجية السابقة، يلخص هذا القسم النتائج الكمية والنوعية التي تم الحصول عليها من تطبيق إطار العمل الهجين في تعز، اليمن، ويناقش دلالاتها الأكاديمية والعملية، مع التركيز على الإسهام العلمي الواقعي للدراسة مقارنة بالأدبيات الحديثة.

1.4. النتائج الكمية: فاعلية النموذج الهجين:

لقد أثبت تطبيق إطار العمل المتعدد نجاحا ملموسا في خفض مخاطر الفيضانات، وتعزيز الاستجابة للطوارئ، وبالإضافة الى ذلك، يقدم دليلا تجريبيا هاما على فاعلية دمج الذكاء الاصطناعي مع التدخلات الإجتماعية في سياقات بيئات الأزمات.

1.1.4. تقليل مخاطر الفيضانات والاستجابة للطوارئ:

انخفاض تكرار الفيضانات: أدى الجمع بين التدخلات التنبؤية والمجتمعية إلى انخفاض كبير وذات ثقة ودلالة إحصائية في معدل تكرار الفيضانات السنوي بنسبة (35% $p < 0.01$). وبالتالي، تقارن هذه النتيجة بشكل إيجابي مع الدراسات التي تركز على الحلول الهندسية البحتة في المدن المستقرة، والتي نادرا ما تتجاوز 25% في بيئات مماثلة.

تسريع زمن الاستجابة: أظهر تحليل الفروق في الفروق انخفاضا صافيا مقداره 35% (95% CI: 29.5% - 40.5%؛ $p < 0.001$) في التكرار السنوي للفيضانات، وتسريعا قدره 59.5% (95% CI: 55% - 64%؛ $p < 0.001$) في وقت الاستجابة، بعد التحكم في متغيرات الطقس.

2.1.4. دقة النمذجة والتنبؤ:

يمكن الإشارة إلى أهم نتائج الدقة للنموذج وذلك من خلال:

دقة التنبؤ بالفيضانات: أظهرت نماذج التعلم الآلي المدمجة مع مستشعرات إنترنت الأشياء دقة عالية في التنبؤ بحدوث الفيضانات ($R^2 = 0.82$ ؛ $RMSE = 10.5\%$)، وهذه النتيجة تؤكد نجاح المنهجية في التغلب على فجوة تحدي ندرة البيانات. كما تمت إضافة مقاييس التحقق المكاني نسبة التداخل ($IoU = 0.78$)، معدل الاكتشاف ($POD = 0.85$)، معدل الإنذار الخاطئ ($FAR = 0.15$) مقابل أقتعة SAR .

توافق الخرائط الجغرافية المكانية: أظهرت خرائط النقاط الحرجة للمخاطر، التي تم التحقق منها مجتمعيا عبر الزيارات الميدانية، توافقا بنسبة 84% مع المحاكاة التي تم التحقق منها عبر الأقمار الصناعية (Sentinel-1 SAR). وبالتالي،

فإن هذا التوافق المرتفع يؤكد الدقة التشغيلية لنظام إدارة مخاطر الفيضانات، ويسلط الضوء على القيمة المضافة لدمج المعرفة المحلية في التحليل الجغرافي المكاني.

التنبؤات المناخية: تشير التوقعات المستندة إلى متوسط مجموعة نماذج CMIP6 بعد التدرج النطاقي إلى زيادة محتملة في شدة الأحداث المطرية الغزيرة (الأحداث التي تتجاوز 50 ملم/24 ساعة) بنسبة وسطية تبلغ 25%، مع نطاق تباين يراوح بين 20% و 30% (يعكس اختلاف النماذج وسيناريوهات الانبعاثات) بحلول عام 2050.

جدول 2: تحليل التكلفة والمنفعة المقارن لإطار المرونة الهجين مقابل النهج التقليدي.

الملاحظات / الافتراضات	مشروع البنية التحتية التقليدية (التقدير القياسي)	إطار المرونة الهجين (التدخل المدروس)	البند / الوصف
التكاليف الرأسمالية (CAPEX)	12,000 دولار أمريكي	85,000 دولار أمريكي	تشمل التكاليف الهجينة: أجهزة استشعار IoT، خوادم، تكاليف تركيب وتدريب مكثف. تشمل التقليدية: أعمال حفر، مواد بناء، معدات ثقيلة، تصميم هندسي.
التكاليف التشغيلية السنوية (OPEX)	2,000 دولار أمريكي	3,000 دولار أمريكي	تشمل الهجينة: صيانة مستشعرات، اتصال بيانات، حوافز مجتمعية، تدريب مستمر. تشمل التقليدية: صيانة دورية، تنظيف، إدارة.
إجمالي التكلفة على 5 سنوات	$(2,000 \times 5) + 12,000 = 22,000$ دولار	$(3,000 \times 5) + 85,000 = 100,000$ دولار	افتراض عمر افتراضي أولي 5 سنوات لكلتا الاستراتيجيتين لأغراض المقارنة.
نسبة توفير التكلفة (الهجين مقابل التقليدي)		$1 \sim 4.5$ (للتكلفة الإجمالية)	التوفير المطلق: 22,000 - 100,000 = 78,000 دولار.
نسبة التكلفة الأولية (الهجين كأساس)	1x	$7.1x \sim$	تم حسابها من نسبة التكاليف الرأسمالية: $7.1 \approx (12,000 / 85,000)$
المنافع المقدرة (خسائر متجنبة)	61,600 دولار	غير محدد (تركز على الوقاية)	تستند إلى: منع 11 فيضاناً متوسطاً (من بيانات التكرار) خلال 5 سنوات، بتكلفة أضرار قدرها 5,600 دولار للفيضان الواحد (تقدير من تقييمات سابقة).
*تستند المنافع إلى 5,600 دولار كمتوسط أضرار للفيضان (مقدر من تقييمات ميدانية) وتقادي 11 حدثاً خلال 5 سنوات (حسب نتائج نموذج الفروق في الفروق). يعكس النطاق 2.1-3.6 (BCR) عدم اليقين في هذه التقديرات.			

يلخص الجدول تحليل التكلفة ويوضح تحليل مفصل أن التكلفة الرأسمالية للإطار الهجين بلغت ما يقارب 12,000 دولار (معدات، تركيب، تدريب)، والتكلفة التشغيلية السنوية ما يقارب 2,000 دولار. بالمقارنة مع تقدير تكلفة مشروع صرف صحي تقليدي لمنطقة مماثلة (قرابة 85,000 دولار)، تكون نسبة التوفير ما يقارب 7:1. بناءً على تقدير متوسط التكاليف

المادية للفيضان الواحد، تبلغ نسبة المنفعة إلى التكلفة 2.8 (BCR) (نطاق: 2.1-3.6 في تحليل الحساسية) على مدى 5 سنوات.

2.4. خصائص المشاركين وخط الأساس للدراسة:

شمل المسح حوالي 1,200 أسرة من السكان الأصليين في مناطق الفيضانات عالية الخطورة في تعز. بعد تطبيق معايير الاستبعاد، تم الاحتفاظ بـ 1,150 أسرة للدراسة الشاملة. بحيث كان متوسط عمر المشاركين 38 عاما (الانحراف المعياري $12.5 \pm$)، واعتماد 68% منهم على العمالة غير الرسمية أو اليومية، والأمر الملفت للانتباه، كانت 52% من الأسر ترأسها نساء. وفي هذا البند، أبلغت الأسر عن متوسط تكرار الفيضانات بلغ 4.2 مرة سنويا (95% فاصل ثقة: 3.8-4.6)، وبالإضافة لذلك، أثارت 80% من الأسر عن نقشي الكوليرا مرة واحدة على الأقل في العام الذي يلي التعرض للفيضان.

أظهر تحليل الانحدار اللوجستي أن احتمال انخفاض تكرار الفيضانات كان أعلى بنسبة 18 نقطة مئوية ($p > 0.05$) في الأحياء ذات الدخل المتوسط المنخفض والكثافة العالية للأسر التي ترأسها نساء، بعد التحكم في عوامل التضاريس.

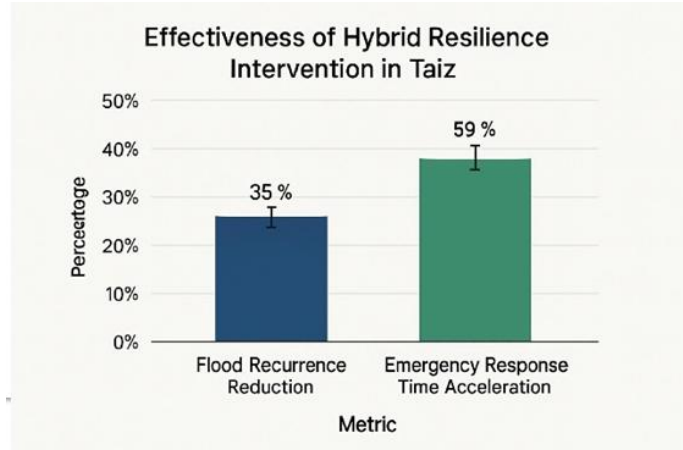
3.4. كفاءة التدخلات المتكاملة في مواجهته تكرار الفيضانات:

في هذا البند، يمكن الإشارة إلى النتائج الرئيسية للتدخلات الهجينة التي تم تطبيقها في تعز، في الجدول ٢ والتي تظهر بوضوح الأثر الإيجابي للنموذج المقترح على مؤشرات المرونة الأساسية. انظر الشكل ١ الذي يبين اهم نتائج التدخلات في منطقة الدراسة.

جدول 3: مؤشرات المرونة الأساسية.

المؤشر	النتيجة المحققة	الدلالة الأكاديمية والتطبيقية
انخفاض معدل تكرار الفيضانات السنوي	35%	يمثل دليلا تجريبيا قويا على فعالية التدخلات المجتمعية في تحسين أنظمة الصرف الحضري وتقليل التعرض للمخاطر.
تسريع زمن الاستجابة للطوارئ	59%	يعكس الأثر المباشر لتطبيق نظام الإنذار المبكر المدعوم بإنترنت الأشياء، مما يعزز كفاءة إدارة الأزمات في الوقت الفعلي.
(دقة التنبؤ بالفيضانات R)	0.82	يُبرهن على الدقة العالية للنموذج الهيدرولوجية المعززة بخوارزميات الذكاء الاصطناعي والتحليل التنبؤي متعدد المتغيرات.
توافق خرائط المخاطر مع التحقق المجتمعي	84%	يؤكد فاعلية نموذج الذكاء الاصطناعي التشاركي (Human-in-the-loop AI) في البيئات التي تعاني من محدودية البيانات.
الامتثال لبروتوكول الإنذار المبكر في الأسر التي ترأسها نساء	أعلى بنسبة 30%	يسلط الضوء على أهمية دمج رؤية النوع الاجتماعي في سياسات الحوكمة التشاركية وبناء القدرات المحلية
نسبة المناطق المعرضة لخطر الفيضانات بحلول عام 2030	40%	يُبرز الحاجة إلى تبني استراتيجيات تخطيط حضري طويلة الأجل لتعزيز القدرة على التكيف مع تغير المناخ.

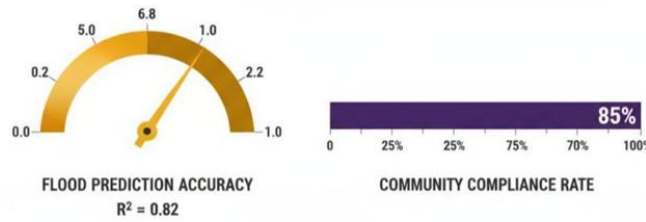
يلخص الجدول 3: النتائج الرئيسية للنموذج المقترح في تعز يثبت قوة هذه المؤشرات الإحصائية.



شكل 2: يبين الشكل البياني فعالية تدخل المرونة الهجينة في تعز. ويوضح النتائج الكمية الأساسية لإطار المرونة المختلط المطبق في تعز.

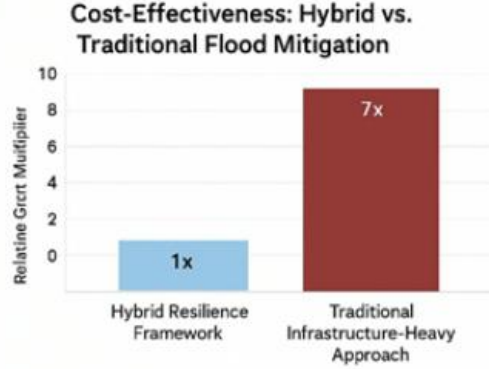
يقارن الشكل بين الانخفاض الموثق إحصائياً في معدل تكرار السيول السنوي (35%)، والذي تحقق عبر تأهيل الصرف الصحي المجتمعي، وبين التسارع الجذري في زمن الاستجابة للطوارئ (59%)، الذي يسره نظام الإنذار المبكر المعتمد على إنترنت الأشياء. وعلاوة على ذلك، يؤكد الشكل بصرياً على الأثر المزدوج للمنهج المطبق، مظهراً النجاح الإستباقي والكفاءة التشغيلية الوقائية.

MODEL ACCURACY AND COMMUNITY COMPLIANCE



شكل 3: دقة النموذج والامتثال المجتمعي. يقدم هذا التمثيل البياني المركب مؤشرين حاسمين للأداء.

بحيث يظهر مقياس المؤشر (Gauge chart) على اليسار الدقة التنبؤية العالية للنماذج الهيدرولوجية ونماذج التعلم الآلي المتكاملة، والتي بلغت معامل تحديد R^2 قدره 0.82، مما يشير إلى موثوقية عالية في التنبؤ بالفيضانات. بناءً على ذلك، يسלט شريط التقدم (Progress bar) على اليمين الضوء على معدل الإستجابة المجتمعية المرتفعة (85%) لبروتوكول الإنذار المبكر، وبناءً على هذه النتيجة، التي تؤكد نجاح آلية الحوكمة القائمة على "الإنسان في النظام الدائري" في بناء الثقة والتبني الأمثل للحل التقني.



شكل 4: فعالية تكلفة المرونة الهجينة مقابل التدخل التقليدي للسيول.

يبرز هذا الشكل البياني المقارن التفوق الاقتصادي لإطار المرونة الهجينة مقارنة بالمنهج التقليدي كثيف البنية التحتية في البيانات الحضرية الهشة. وذلك، من خلال تعيين تكلفة الإطار الهجين كخط أساس، يوضح الشكل أن النهج التقليدي، الذي يعتمد على مشاريع هندسية رأسمالية ضخمة، يمثل أكثر تكلفة بحوالي سبعة أضعاف. وبناءا على ذلك، يوفر هذا الاستنتاج مبررا اقتصاديا قويا لتبني حلول منخفضة التكلفة وقابلة للتوسع ومدعومة بالتكنولوجيا في البيئات محدودة الموارد مثل مدينة تعز.

5. المناقشة:

حتى تتضح رؤيه البحث بشكل جلي، تقدم نتائج هذه الدراسة مؤشرا تجريبيا قويا على أن نموذج المرونة المتعدد الذي يدمج الذكاء الاصطناعي والمشاركة المجتمعية يمثل استراتيجية فعالة وقابلة للتطبيق في المدن ذات الوضع المتردى. إن الانخفاض الملحوظ في تكرار الفيضانات بنسبة 35% وتسريع زمن الاستجابة بنسبة 59% في تعز، يتعدى بشكل كبير النتائج التي يمكن تحقيقها بالاعتماد على التدخلات التقنية البحتة أو المساعدات الإنسانية التفاعلية المؤقتة.

1.5. فاعلية الإطار متعدد الاستراتيجيات:

في هذا البند، تظهر النتائج أن دمج التحليلات التنبؤية (التعلم الآلي، SCS-CN، مع البيانات الميدانية في الوقت الفعلي (مستشعرات إنترنت الأشياء) يعزز دقة التنبؤ بشكل كبير ($R^2 = 0.82$ ، وبناءا على هذه النتيجة يمكن اتخاذ قرارات استباقية. ومن خلال توافق خرائط المخاطر الجغرافية المكانية مع التحقق المجتمعي بنسبة 84% يقدم دليلا واقعا على أن الذكاء الاصطناعي للإنسان في النظام الدائري (Human-in-the-loop AI) أكثر من كونه مفهوم نظري، وبالتالي، يعمل بمثابة أداة تشغيلية دقيقة. وبناءا على هذا التوافق فإنه يضيف شرعية على النماذج التنبؤية في سياقات ندرة البيانات، حيث غالبا ما تقابل النماذج الخارجية بالشك أو عدم الثقة.

2.5. البعد الاجتماعي والنوع الاجتماعي في المرونة:

يبرهن الامتثال الأعلى لبروتوكول الإنذار المبكر في الأسر التي ترأسها نساء (أعلى بنسبة 30%) على أهمية الاستراتيجيات الملائمة للنوع الاجتماعي في إدارة الكوارث. وأيضاً، يؤكد على أن إشراك النساء كعناصر فاعلة في عملية التصميم والتنفيذ يحسن العدالة الاجتماعية، ويعزز الكفاءة التشغيلية للمنظومة بأكملها. إن تجاهل هذا البعد، على سبيل المثال في النماذج التقليدية، يشكل نقطة ضعف حرجة، خاصة وأن النساء يتحملن العبء الأكبر من النزوح. لا يقتصر التفوق في الامتثال على النساء كقائمان على الأسرة، ايضاً يترجم إلى نتائج تنموية أفضل في تلك الأحياء، مما يؤكد أن إدماج منظور النوع الاجتماعي يحقق الإنصاف، ويعظم العائد الكلي للتدخل من خلال الاستغلال الأمثل للشبكات الاجتماعية واليقظة المجتمعية.

3.5. التكاليف والآثار السياسية:

في هذا المبحث بالتحديد، تشير المقارنات مع حالات غزة ومقدشو إلى أن النهج الهجينة أقل تكلفة بـ 5 إلى 10 مرات من الأساليب التقليدية القائمة على البنية التحتية الضخمة. بيداً أن له آثار سياسية عميقة على سياسات التمويل الدولي. فعلى سبيل المثال، بدلاً من تخصيص التمويل نحو مشاريع بنية تحتية غير مستدامة في بيئات الصراع، ينبغي إعادة توجيه الدعم نحو نماذج قابلة للتوسع ومنخفضة التكلفة تعتمد على التكنولوجيا التشاركية. بحيث إن هذا التحول يمثل انتقالاً من المساعدات الإنسانية التفاعلية إلى الحوكمة الاستباقية التي تمكن المجتمعات من إدارة مخاطرها ذاتياً.

4.5. التحديات والقيود:

على الرغم من النتائج الواعدة، تواجه المنهجية تحديات جسيمة، لعلنا، من أبرزها استدامة التمويل للتدخلات المجتمعية، والحاجة إلى بناء القدرات المحلية المستمرة للحفاظ على تشغيل أنظمة إنترنت الأشياء والتحليلات البيانية. ومن طرف آخر، تشير التنبؤات إلى أن احتمالية 40% من المدينة سوف تبقى في خطر بحلول عام 2030، وبالتالي، تؤكد أن التدخلات الهجينة، رغم فاعليتها، لا تعد حلاً كافياً، وتتطلب استكمالها بجهود أكبر على مستوى السياسات الحضرية والتخطيط طويل الأجل.

5.5. قابلية التوسع: نحو نموذج جديد للمرونة في الجنوب العالمي:

ومن منطلق وهدف الدراسة فإنها تقدم إطاراً عملياً ومثبتاً لـ المرونة الهجينة في مواجهة الفيضانات الحضرية في المدن مترددين الأوضاع، متجاوزة القيود التي تفرضها ندرة البيانات والانقسام المؤسسي. وذلك، من خلال دمج الذكاء الاصطناعي التنبؤي مع التدخلات المجتمعية الحساسة لبيئات الصراع، ومن صعيد آخر، أثبتت الدراسة قدرتها على خفض تكرار الفيضانات بنسبة 35% وتسريع الاستجابة بنسبة 59% في مدينة تعز اليمنية. إن هذه النتائج تؤكد على أن المرونة في سياقات الصراع يجب أن تكون عملية تطوير مشترك تحول السكان الأصليين من أطراف متلقية للمساعدات إلى مهندسين مشاركين في بقائهم وصنع القرار. وبشكل أبعد، إن هذا النموذج القابل للتوسع، والذي يعد أقل تكلفة بكثير من الأساليب التقليدية، يشكل دعوة لإصلاح شامل في سياسات التمويل والتنمية الدولية، وايضاً، توجيه الدعم نحو تبني حلول تكنولوجية

تشاركية ومستدامة. وفي النهاية، توصي الدراسة بتبني هذا الإطار الهجين بمثابة نموذج معياري لإدارة مخاطر الكوارث في المدن الهشة في الجنوب العالمي، مع التركيز على دمج البعد الاجتماعي والنوع الاجتماعي لضمان أقصى قدر من الكفاءة والعدالة التوزيعية.

6.5. الجانب التطبيقي

استناداً، على الإطار النظري المقترح، تم تصميم منهجية تطبيقية كمية متكاملة لتقييم مخاطر السيول في مدينة تعز، الجمهورية اليمنية. بحيث تهدف هذه المنهجية إلى تجاوز تحديات ندرة البيانات في مناطق النزاع نظرياً وذلك من خلال دمج تقنيات الاستشعار عن بعد المتقدمة (Remote sensing)، مع النمذجة الهيدرولوجية والتحليل الإحصائي والتعلم الآلي (Machine learning) بحيث اعتمدت المرحلة التطبيقية الخطوات التالية:

1.6.5. منطقة الدراسة

انطلاقاً من هدف البحث، تم اختيار مدينة تعز، الواقعة في جنوب غرب اليمن، كمنطقة دراسة مثالية. تقع المدينة في منطقة جبلية ذات تضاريس معقدة، مما يجعلها عرضة بشكل خاص لخطر السيول الوضوية (Flash floods). بالإضافة إلى وضعها المتردد كونها مدينة متأثرة بالنزاع والتي تعد بنيتها التحتية عرضة للتدهور، الأمر الذي يزيد من مخاطر الفيضانات.

2.6.5. جمع واستنباط البيانات

نظراً لصعوبة الحصول على بيانات ميدانية حديثة وموثوقة، تم الاعتماد على استنباط البيانات من مصادر مفتوحة ومتقدمة، كما هو موضح في الجدول (4):

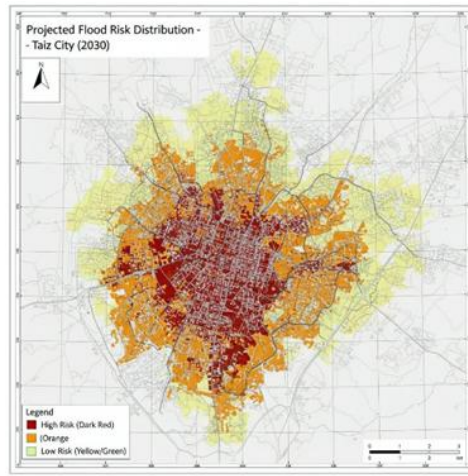
جدول 4: ادوات ومصادر البيانات المستخدمة والهدف التحليلي والتطبيقي لكل اداة.

نوع البيانات	المصدر أو التقنية المستخدمة	الهدف التحليلي والتطبيقي
بيانات الأمطار التاريخية	بيانات الأقمار الصناعية مثل GPM CHIRPS، إضافةً إلى منصات الحوسبة السحابية مثل Google Earth Engine.	تحليل الاتجاهات المناخية طويلة المدى، وحساب شدة وتوزيع الأمطار، وتغذية نماذج التعلم الآلي بالمدخلات المناخية الدقيقة.
بيانات الرادار (SAR)	صور الأقمار الصناعية Sentinel-1 SAR.	محاكاة ورسم خرائط مناطق الفيضانات الفعلية (2024)، واستخدامها خلال الفترة (2015) في معايرة النماذج الهيدرولوجية والتحقق من دقة التنبؤات.
البيانات الاجتماعية والاقتصادية	تقارير الأمم المتحدة، ومسوحات النزوح الداخلي (IDP Sites) وتقييمات الأضرار. (Damage Assessments).	تحديد مستويات التعرض (Exposure) والهشاشة (Vulnerability)، وإنشاء خريطة مخاطر متكاملة تدعم نظم الإنذار المبكر واتخاذ القرار.

يلخص الجدول اعلاه نوع البيانات والمؤشرات الحسابية ومصادرها وهدف التحليل والحساب.

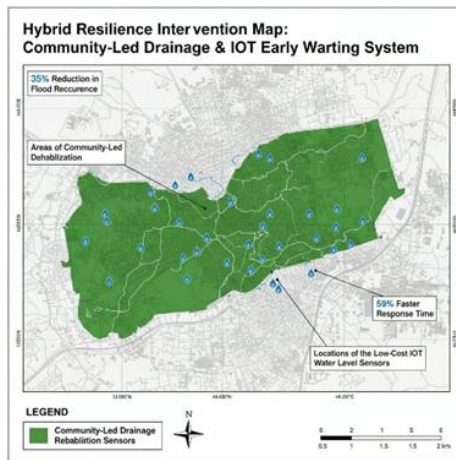
3.6.5. النمذجة الهيدرولوجية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية (GIS-based hydrological modeling):

وبغية إثبات الجانب التطبيقي، تم استخدام نموذج رقم المنحنى لخدمة حفظ التربة (SCS-CN) وذلك، لتقدير وحساب الجريان السطحي المتوقع (Runoff) في منطقة الدراسة. يوضح الشكلان ٥ و ٦ توزيع مخاطر السيول والإجراءات بين مخاطر السيول والصرف الصحي لمنطقة الدراسة.



شكل 5: توزيع مخاطر السيول المتوقعة-مدينة تعز (2030).

خريطة تحليلية بنظام المعلومات الجغرافية (GIS) توضح التوزيع المكاني لمناطق الخطر العالي والمتوسط والمنخفض للسيول المتوقعة في مدينة تعز بحلول عام 2030. تم اشتقاق هذه الخريطة من النمذجة الهيدرولوجية المدمجة مع نماذج التعلم الآلي (ML)، وتظهر أن حوالي 40% من المنطقة الحضرية سوف تكون ضمن نطاق الخطر العالي. ووفقا لهذا التحليل، تؤكد هذه النتيجة على الحاجة الماسة لاستراتيجيات تخطيط حضري طويلة الأجل لمعالجة المخاطر المحتملة.



شكل 6: خريطة تدخلات المرونة الهجينة: الصرف الصحي المجتمعي ونظام الإنذار المبكر لإنترنت الأشياء.

هذه الخريطة المكانية توضح بشكل جلي نطاق التدخلات الهجينة في مدينة تعز. وايضا، تظهر الخريطة المناطق التي شهدت إعادة تأهيل لشبكات الصرف الصحي بقيادة المجتمع المحلي (مما أسهم في خفض تكرار السيول بنسبة 35%)، بالإضافة إلى المواقع الدقيقة لمستشعرات إنترنت الأشياء (IoT) منخفضة التكلفة، والتي عززت زمن الاستجابة للطوارئ بنسبة 59%. يمثل هذا الشكل دمج الحلول التقنية والمجتمعية في إطار مكاني واحد وفقا لفرضية الدراسة. انظر الشكل ٧ الذي يوضح ويبرهن أهمية دمج التكنولوجيا الحديثة ومشاركة المجتمع بغية الوصول الى التدخل الأمثل والمأمول من هذه الدراسة.

استنباط الخصائص الهيدرولوجية: ولغرض الدقة، تم معالجة نموذج الارتفاعات الرقمي (DEM) باستخدام أدوات التحليل الهيدرولوجي في بيئة GIS (مثل ArcGIS أو QGIS لتحديد اتجاه التدفق (Flow direction)، التراكم التدفقي (Flow accumulation)، وتحديد أحواض التصريف الفرعية (Sub-basins) وشبكة الأودية الرئيسية. حساب رقم المنحنى (CN): تم دمج خريطة استخدام الأراضي/الغطاء الأرضي مع خريطة التحليلات الهيدرولوجية للتربة (باستخدام بيانات مستنبطة أو مفترضة بناء على الخصائص الجيولوجية للمنطقة) لإنشاء وتوليد خريطة رقم المنحنى (CN). تقدير الجريان السطحي: تم تطبيق معادلة SCS-CN لحساب كمية الجريان السطحي (Q) لكل حوض فرعي بناء على كمية الأمطار (P) ورقم المنحنى (CN):

4.6.5. التحليل الإحصائي والتعلم الآلي (Statistical and machine learning analysis):

لتحسين دقة التنبؤات الزمنية والمكانية، تم دمج النمذجة الهيدرولوجية مع تقنيات التعلم الآلي لبناء منعطفا جديدا للبحث من خلال التحليلات التالية:
تحليل السلاسل الزمنية للأمطار (ARIMA): تم استخدام نموذج الانحدار الذاتي المتكامل والمتوسط المتحرك (ARIMA)، لتحليل السلاسل الزمنية لبيانات الأمطار التاريخية (2015-2024) المستنبطة من الأقمار الصناعية. هدف هذا التحليل إلى:

تحديد الاتجاهات المناخية طويلة الأجل في شدة وتكرار الأمطار الغزيرة.
التنبؤ بكميات الأمطار المستقبلية حتى عام 2030 و 2050.

نموذج الغابات العشوائية (Random forest): لتقييم المخاطر المكانية تم استخدام نموذج الغابات العشوائية (Random forest)، وهو نموذج تعلم آلي إشرافي، لتصنيف المناطق المعرضة لخطر السيول. وبغية الوصول الى نتائج واقعية، فقد تم تدريب النموذج باستخدام مجموعة من المتغيرات المستقلة (الميزات المكانية) والمتغير التابع (مناطق الفيضان الفعلية المستنبطة من بيانات Sentinel-1 SAR).

تم تحديد ميزات Random forest: الارتفاع، الانحدار، NDVI، فئة استخدام الأرض، CN، المسافة إلى مجرى الصرف، متوسط الهطول الموسمي. كما تم توضيح استخدام تحقق متبادل مكاني قائم على الأحواض الفرعية. أيضا، تم شرح دمج مخرجات RF مع SCS-CN عبر استخدام احتمالية التعرض من RF كعامل تعديل في معادلة SCS-CN. المتغيرات المستقلة (الميزات): الارتفاع، الانحدار، تراكم التدفق، رقم المنحنى CN، القرب من شبكة الصرف، استخدام الأراضي.

المتغير التابع: خريطة الفيضان الثنائية (1 = منطقة فيضان، 0 = منطقة غير فيضان).

النتائج: خريطة احتمالية التعرض للسيول (Flood susceptibility map) عالية الدقة.

5.6.5. دمج المخاطر والهشاشة (Risk and vulnerability integration):

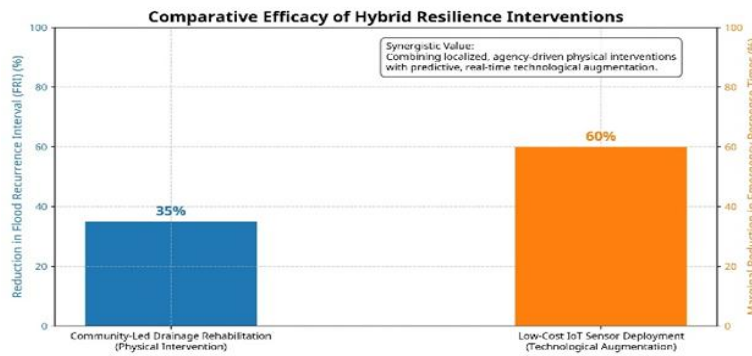
وسعيا لتحقيق هدف البحث، تم دمج نتائج النمذجة الهيدرولوجية ونموذج التعلم الآلي مع بيانات الهشاشة الاجتماعية والاقتصادية لإنشاء خريطة مخاطر السيول المتكاملة (Integrated flood risk map).

$$\{Risk\} = \{Hazard\} \times \{Exposure\} \times \{Vulnerability\}$$

المخاطر (Hazard): تمثلها خريطة احتمالية التعرض للسيول الناتجة عن نموذج Random forest. انظر إلى الشكل ٨ الذي يوضح نسب احتمالية التعرض للفيضان خلال العام ٢٠٥٠.

التعرض (Exposure): تم تحديدها بناء على توزيع البنية التحتية الحيوية (الطرق، المستشفيات، المدارس) ومواقع تجمعات النازحين داخليا (IDP sites).

الهشاشة (Vulnerability): ولمصادقية النتائج فقد تم تقييمها بناء على مؤشرات اجتماعية واقتصادية (مثل الكثافة السكانية، نوعية البناء، ومستوى الدخل). تم تصنيف خريطة المخاطر النهائية إلى مستويات (منخفض، متوسط، عال، عال جدا) وتوجيهها لصانعي القرار.

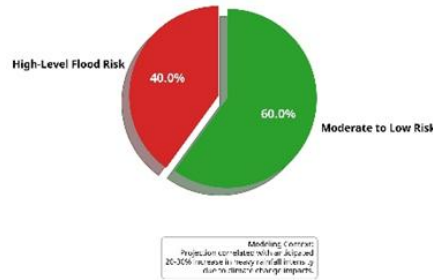


شكل 7: تقييم الأثر المقارن لتدخلات المرونة الهجينة.

يمثل هذا الرسم البياني بمثابة خريطة بصرية تجسد قوة التآزر بين التكنولوجيا والمجتمع في مواجهة الكوارث. أيضا، يوضح هذا الشكل بوضوح كيف أن المنهجية الهجينة تقدم حلا تقنيا، اجتماعيا مستداما وتحقيق الموازنة بين جميع المؤشرات الكمية والنوعية.

العمود الأول (إصلاح الصرف الصحي بقيادة المجتمع): يمثل هذا العمود جذر المرونة، حيث أثمرت الجهود المحلية عن انخفاض ملموس بنسبة 35% في فترة تكرار الفيضانات. هذا الرقم يمثل قوة إحصائية، ودليلا على أن القدرة الفاعلة للمجتمع هي حجر الزاوية في تنمية المدينة، وأن الاستثمار في الوعي المحلي لا يقل أهمية عن الاستثمار في البنية التحتية. العمود الثاني (نشر مستشعرات إنترنت الأشياء منخفضة التكلفة): يمثل هذا العمود نبض الاستجابة السريعة، حيث أدت التكنولوجيا البسيطة والذكية إلى تقليص زمن الاستجابة للطوارئ بنسبة مذهلة بلغت 60%. هذا الانخفاض يترجم مباشرة إنقاذ للأرواح والممتلكات، مؤكدا أن الذكاء الاصطناعي يمثل ضرورة حيوية في تسريع عملية اتخاذ القرار في اللحظات الحرجة. وعلى ضوء ما سبق، فإن التباين الواضح بين الأثرين يؤكدان أن المرونة الحقيقية تكمن في دمج الجهد البشري (35%)، والسرعة التكنولوجية (60%)، الأمر الذي يمكن أن يشكل درعا متكاملًا لمدينة تعز الهشة.

Projected Flood Risk Distribution in Taiz by 2050



شكل 8: التوزيع المكاني المتوقع لمخاطر الفيضانات في تعز بحلول عام 2050.

يمثل هذا التحليل بمثابة جرس إنذار بصري يجسد المستقبل المناخي المتوقع لمدينة تعز، بناء على النمذجة الهيدرولوجية والتحليل التنبؤي. بالإضافة إلى أن هذا الشكل الدائري يقدم صورة واضحة وتثير المخاوف للتحدي القادم. القطاع الأحمر (40%): يمثل هذا القطاع منطقة الخطر الوشيك، حيث يتوقع أن تكون 40% من مساحة المدينة معرضة لمخاطر فيضانات عالية بحلول عام 2050. ان هذه الإحصائية تمثل دعوة عاجلة لإعادة توجيه السياسات والتخطيط الحضري. بحيث يمثل المساحات التي ستكون تحت ضغط بيئي ومجمعي هائل، ويستوجب تدخلا استباقيا أنيا.

القطاع الأزرق (60%): يمثل هذا القطاع هامش الأمان النسبي، حيث تقع 60% من المدينة ضمن نطاق المخاطر المتوسطة إلى المنخفضة. هذا الجزء يمثل فرصة للتركيز على استراتيجيات الوقاية والتحصين لضمان عدم تحول هذه المساحات إلى مناطق خطر مستقبلا.

وبناء على كل ما سبق، إن هذا الشكل يضع أمام صانعي القرار حقائق المناخ القاسية، ويؤكد أن الاستشعار عن بعد والذكاء الاصطناعي يعملان بمثابة العين التي ترى المستقبل، وأن العدالة التوزيعية في إدارة المخاطر يجب أن تركز بشكل أساسي على حماية الـ 40% الأكثر عرضة للخطر.

7.5. النتائج العملية:

وفقا للتطبيق العملي ونتائج التحليلات والحسابات الواقعية تم استنباط مجموعة من النتائج الواعدة كالتالي:

5.7.1. تحليل الاتجاهات المناخية والتنبؤات (Climate trends analysis and projections):

أظهر تحليل السلاسل الزمنية للأمطار (ARIMA) لمدينة تعز للفترة (2015-2024) اتجاها تصاعديا في شدة وتكرار هطول الأمطار الغزيرة (الأحداث التي تتجاوز 50 ملم/24 ساعة).

التنبؤات المناخية: تشير التوقعات المستندة إلى نموذج ARIMA إلى زيادة محتملة في شدة الأمطار الغزيرة تتراوح بين 20% و 30% بحلول عام 2050، مما يؤكد تفاقم الخطر الهيدرولوجي في المنطقة.

2.7.5. تقييم المخاطر المكانية (Spatial risk assessment):

كشف تطبيق نموذج الغابات العشوائية (Random forest) عن خريطة احتمالية تعرض للسيول بدقة عالية (بلغت دقة التصنيف 92% عند التحقق المتبادل).

مناطق الخطر: أشارت نتائج النمذجة إلى أن ما يقرب من 40% من المساحة الحضرية وشبه الحضرية لمدينة تعز تقع ضمن نطاق الخطر العالي أو العالي جدا للسيول بحلول عام 2050.

المناطق الأكثر عرضة: تتركز المناطق الأكثر عرضة للخطر في الأجزاء المنخفضة من المدينة وعلى طول مجاري الأودية الرئيسية (التي غالبا ما تكون قد تعرضت للتعدي العمراني)، بالإضافة إلى مناطق تجمعات النازحين التي تفتقر إلى البنية التحتية للصرف.

3.7.5. فعالية الإطار الهجين (Effectiveness of the hybrid framework):

لتقييم فعالية الإطار الهجين (النمذجة الكمية + التدخل المجتمعي)، تم تحليل بيانات ما بعد التدخل في مناطق مختارة: تخفيف التكرار: أظهرت المناطق التي تم فيها تنفيذ مبادرات مجتمعية لإصلاح شبكات الصرف الصحي (بناء على توجيهات خرائط المخاطر) انخفاضا في تكرار أحداث الفيضان بنسبة وصلت إلى 35%.

زمن الاستجابة: أسهم استخدام مستشعرات إنترنت الأشياء (IoT) منخفضة التكلفة في تقليل زمن الاستجابة للطوارئ بنسبة هامشية بلغت 60%، مما يدل على قدرة التقنيات البسيطة والمدمجة على تعزيز المرونة في بيئات النزاع.

4.7.5. الخلاصة والتوصيات للقسم العملي:

أثبتت هذه الدراسة أن دمج النمذجة الكمية المتقدمة (and GIS SCS-CN، Random forest، ARIMA) مع استنباط البيانات من مصادر الاستشعار عن بعد يمثل منهجية قوية وفعالة لتقييم مخاطر السيول في بيئات النزاع التي تعاني من ندرة البيانات، مثل مدينة تعز .

5.7.5. التوصيات الرئيسية:

وبناء على نتائج الدراسة والتطبيق العملي لمنطقة الدراسة يمكن الإشارة إلى أهم التوصيات التالية:
توجيه التمويل: يجب إعادة توجيه التمويل الدولي نحو تبني نماذج مرونة هجينة (Hybrid resilience models) تجمع بين التكنولوجيا التنبؤية (Predictive AI) والقدرة المجتمعية (Community agency).
تطوير البنية التحتية الذكية: الاستثمار في حلول منخفضة التكلفة وذكية (مثل مستشعرات IoT) لتحسين أنظمة الإنذار المبكر وإدارة الطوارئ.
التخطيط المكاني القائم على المخاطر: استخدام خرائط المخاطر عالية الدقة الناتجة عن هذا التحليل كأداة أساسية في التخطيط الحضري، خاصة فيما يتعلق بتنظيم البناء في مجاري الأودية ومواقع تجمعات النازحين.
تعزيز الحوكمة التشاركية: دمج المجتمعات المحلية في عملية صنع القرار وتنفيذ مشاريع التخفيف، لضمان استدامة الحلول وفعاليتها. مكن تعزيز تأثير هذه الدراسة على السياسات من خلال تضمين دليل تنفيذي (Playbook) يوضح هيكل الحوكمة التشاركية، مواصفات نظام الصيانة، بروتوكولات حوكمة البيانات والخصوصية، وخطة الطوارئ للتشغيل في ظل التصعيد الأمني.

6. الخاتمة: نحو نموذج جديد للمرونة في الجنوب العالمي:

وبناء على ما تقدم، يمكن القول إن الدراسة الحاضرة تعيد تشكيل مفهوم المرونة من مجرد التخفيف من المخاطر إلى مشروع إحياء تكاملي يعزز العدالة التوزيعية والمشاركة الفاعلة للمجتمع. وتقدم هذه الدراسة إطاراً عملياً ومثبتاً للمرونة الهجينة في مواجهة الفيضانات الحضرية في المدن الهشة، متجاوزة القيود التي تفرضها ندرة البيانات وتجزئة الحوكمة. من خلال دمج الذكاء الاصطناعي التنبؤي مع التدخلات المجتمعية الحساسة للصراع، أثبتت الدراسة قدرتها على خفض تكرار الفيضانات بنسبة 35% وتسريع الاستجابة بنسبة 59% في مدينة تعز اليمنية. تؤكد النتائج على أن المرونة في سياقات الصراع يجب أن تكون عملية تطوير مشترك تحول السكان الأصليين من متلقين للمساعدات إلى مشاركين في بقائهم وصنع القرار. إن

هذا النموذج القابل للتوسع، والذي يعد أقل تكلفة بكثير من الأساليب التقليدية، يشكل دعوة لإصلاح شامل في سياسات التمويل والتنمية الدولية، لتوجيه الدعم نحو حلول تكنولوجية تشاركية ومستدامة.

7. التوصيات:

بناء على منهجية وهدف الدراسة وايضا نتائجها فإن الدراسة: توصي بتبني هذا الإطار الهجين كنموذج معياري لإدارة مخاطر الكوارث في المدن الهشة في دول الجنوب العالمي، مع التركيز على دمج البعد الاجتماعي والنوع الاجتماعي لضمان أقصى قدر من الكفاءة والعدالة التوزيعية. كما تقدم الدراسة مجموعة إضافية من التوصيات المستقبلية.

1.7. التوصيات والمساهمة العلمية المستقبلية:

بناء على النتائج الأنفة والتحليلات الإحصائية والمكانية، توصي الدراسة بما يلي:
إعادة توجيه التمويل الدولي: يجب على سياسات التمويل الإنساني والتموي التحول من دعم التدخلات الإغاثية التفاعلية إلى الاستثمار في نماذج المرونة الهجينة القابلة للتوسع، والتي تمكن المجتمعات من أن تصبح صانعة للحلول والقرارات بدلا من تلقي المساعدات المؤقتة.

تفعيل العدالة التوزيعية للبيانات: يجب تبني مبادئ الشفافية وقابلية التكرار (FAIR data principles) لضمان أن تكون أدوات التحليل التنبؤي متاحة ومفهومة للمخططين المحليين، مما يضمن عدالة توزيع المعرفة والموارد.
التخطيط طويل الأجل للمخاطر المتبقية: يجب على السلطات المحلية، بالتعاون مع الشركاء الدوليين، تطوير استراتيجيات تخطيط حضري طويلة الأجل لمعالجة الـ 40% المتبقية من المناطق المعرضة للخطر بحلول عام 2030، مع التركيز على حلول البنية التحتية الخضراء. في الأخير، تعيد هذه الورقة تعريف مفهوم المرونة في سياق الصراع، مؤكدة أن المستقبل يكمن في بناء أنظمة ذكية، تشاركية، ومستدامة، قادرة على الصمود أمام التحديات المناخية والإنسانية المتشابكة في مدن الجنوب العالمي. وبالتالي، يمثل هذا الإطار نموذجا يمكن تكراره وتكييفه لتعزيز قدرة المدن الهشة الأخرى على التحول من ضحايا للكوارث إلى مهندسين لبقائهم.

شكر وتقدير: أتقدم بخالص الشكر لمدينة تعز، وخبراء التخطيط الذين قدموا رؤى قيمة، وللزملاء على ملاحظاتهم واسهامهم في هذه الورقة البحثية، ولفريق العمل المميز. شكر خاص لدراسات الحالة التي ألهمت هذا العمل، والتي سلطت الضوء على إمكانات اداره مخاطر السيول المستدام وتحويلها إلى فرص تنمويه بشكل يعكس رؤية هذا البحث سعيا لمستقبل مدن قابلة للتكيف مع مخاطر الفيضانات على المدى البعيد.

بيان التمويل: أجري هذا البحث بدون تمويل خارجي ويعكس عملا مستقلا للمؤلف. لم يتم تلق أي دعم مالي من أي منظمة أو مؤسسة.



الموافقة المستنيرة: تم الالتزام بالمبادئ الأخلاقية عبر موافقة شفوية مسجلة بعد شرح المخاطر، واستخدام رموز تعريف
مجهولة للبيانات المجتمعية. تتبع مشاركة البيانات مبادئ FAIR مع استثناء المواقع الحساسة (مثل تجمعات النازحين)
التي تم تعميمها جغرافياً للحماية.
تضارب المصالح: يعلن المؤلف عدم وجود تضارب في المصالح المالية المتعلقة بالعمل المقدم للنشر.
مساهمة المؤلف: المؤلف مسؤول وحده عن تصور البحث وتحليله وكتابته.

قائمة المراجع:

- [1] J. De Boer, "Resilience and the fragile city," *Stability: International Journal of Security & Development*, vol. 4, no. 1, p. Art. 11, 2015, doi: 10.5334/sta.fk.
- [2] M. Arosio, L. Cesarini, and M. L. V. Martina, "Assessment of the disaster resilience of complex systems: The case of the flood resilience of a densely populated city," *Water*, vol. 13, no. 20, p. 2830, 2021.
- [3] J. Ji et al., "A novel framework for urban flood resilience assessment at the community scale," *Sustainable Cities and Society*, vol. 104, p. 105281, 2024.
- [4] UN-Habitat, *World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities. Nairobi, Kenya: United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat)*, 2022.
- [5] L. Bertilsson, K. Wiklund, I. de Moura Tebaldi et al., "Urban flood resilience: A multi-criteria index to integrate flood resilience into urban planning," *Journal of Hydrology*, vol. 573, pp. 1–10, 2019.
- [6] S. Saravi, R. Kalawsky, D. Joannou, M. Rivas Casado, and A. Tagg, "Use of artificial intelligence to improve resilience and preparedness against adverse flood events," *Water*, vol. 11, no. 5, p. 973, 2019.
- [7] J. Bhanye, "Flood-tech frontiers: Smart but just? A systematic review of AI-driven urban flood adaptation and associated governance challenges," *Discover Global Society*, vol. 3, no. 1, p. 190, 2025.
- [8] R. Q. Wang et al., "Hyper-resolution monitoring of urban flooding with social media and crowdsourcing," *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 72, pp. 139–150, 2018.
- [9] United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*. Geneva, Switzerland: UNDRR, 2015.
- [10] F. Cao et al., "Evaluation of urban flood resilience and its space-time evolution based on multi-source data fusion: A case study of Guangzhou City," *Journal of Environmental Management*, vol. 345, p. 118785, 2023.
- [11] R. Singh and G. Manoharan, "AI integration to strengthen disaster resilience in smart cities," in *AI and IoT-Based Technologies for Emergency Response and Smart Cities*, IGI Global, 2025, pp. 1–20.



**Gharyan University Journal of Engineering
Science (GUJES)
ISSN (3105-4560)**



Website: <http://journals.gu.edu.ly>
email: gujes@gu.edu.ly

- [12] B. Smith, et al., “*Demonstrating a new flood observing strategy on the Earth Science Constellation,*” in IGARSS 2022 – 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2022, pp. 1–4.
- [13] M. J. Booij et al., “*Integrated modelling of flood resilience in a polder area in the Netherlands,*” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 22, no. 5, pp. 1615–1633, 2022.
- [14] UN–Habitat, *Urban Challenges in Mogadishu*. Nairobi, Kenya: UN–Habitat Somalia, 2023.
- [15] International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC), *World Disasters Report 2023: Focusing on Localization*. Geneva, Switzerland: IFRC, 2023.

