



Integrated Risk Framework berbasis GIS–MCDA untuk Mengatasi Fragmentasi Risiko Iklim dan Bencana pada Infrastruktur Kritis

A GIS–MCDA-Based Integrated Risk Framework for Addressing Fragmented Climate and Disaster Risks in Critical Infrastructure

Baiq Virgia Srihayati^{1*}

Lalu Ibrohim Burhan²

^{1,2}Universitas Gunung Rinjani, Indonesia

*Email: ghiavirgia92@gmail.com

Info Artikel

Keywords:

Adaptasi Infrastruktur; Analisis Risiko Terpadu; GIS-MCDA; Ketahanan Infrastruktur; Multi-Bencana

Keywords (English):

Climate Resilience; Critical Infrastructure; GIS-MCDA; Integrated Risk Analysis; Multi-Hazard Assessment

Abstrak

Perubahan iklim dan peningkatan frekuensi multi-bencana telah meningkatkan tekanan terhadap keberlanjutan infrastruktur kritis dan kontinuitas layanan publik di berbagai wilayah. Meskipun berbagai penelitian telah mengembangkan analisis risiko berbasis GIS dan multi-hazard, pendekatan yang digunakan masih cenderung sektoral dan terpisah sehingga belum mampu menangkap interaksi lintas risiko, keterkaitan antar infrastruktur, dan efek sistemik secara komprehensif. Penelitian ini bertujuan menyusun Integrated Climate and Disaster Risk Framework berbasis Resilience Theory dan Integrated Risk Theory untuk meningkatkan efektivitas perencanaan ketahanan infrastruktur kritis terhadap ancaman iklim dan bencana. Penelitian menggunakan pendekatan mix methods sequential explanatory melalui integrasi GIS, Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA), dan SEM-PLS pada lima sektor infrastruktur kritis, yaitu air bersih, transportasi, energi, kesehatan, dan telekomunikasi. Data penelitian diperoleh dari BMKG, BNPB, InaRISK, survei lapangan, observasi teknis, serta expert judgment. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sektor air bersih memiliki skor risiko tertinggi sebesar 0,81, sedangkan sektor telekomunikasi menunjukkan skor risiko terendah sebesar 0,51. Uji ANOVA menunjukkan perbedaan signifikan tingkat kerentanan antar sektor ($F = 8,73$; $p < 0,01$), sementara simulasi mitigasi terintegrasi menghasilkan penurunan kerugian infrastruktur sebesar 34% dibandingkan pendekatan parsial. Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan risiko terpadu mampu meningkatkan akurasi identifikasi hotspot risiko, prioritas mitigasi, dan ketahanan infrastruktur lintas sektor. Temuan ini memperkuat pengembangan teori ketahanan sistemik sekaligus menyediakan kerangka praktis bagi perencanaan infrastruktur tahan iklim dan multi-bencana dalam bidang teknik sipil..

Abstract

Climate change and the increasing frequency of multi-hazard events have intensified pressures on the sustainability of critical infrastructure

and the continuity of public services across regions. Although previous studies have developed GIS-based and multi-hazard risk assessments, existing approaches remain largely sectoral and fragmented, limiting their ability to capture cross-risk interactions, infrastructure interdependencies, and systemic effects comprehensively. This study aimed to develop an Integrated Climate and Disaster Risk Framework based on Resilience Theory and Integrated Risk Theory to improve the effectiveness of critical infrastructure resilience planning against climate and disaster threats. The study employed a sequential explanatory mixed-methods approach integrating GIS, Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA), and SEM-PLS across five critical infrastructure sectors, including water supply, transportation, energy, healthcare, and telecommunications. Data were collected from BMKG, BNPB, InaRISK, field surveys, technical observations, and expert judgment. The results revealed that the water supply sector exhibited the highest composite risk score (0.81), whereas the telecommunications sector showed the lowest score (0.51). ANOVA testing indicated significant differences in vulnerability levels among infrastructure sectors ($F = 8.73$; $p < 0.01$), while integrated mitigation simulations reduced infrastructure losses by 34% compared with partial approaches. The findings demonstrate that integrated risk assessment improves hotspot identification accuracy, mitigation prioritization, and cross-sector infrastructure resilience. This study contributes to the advancement of systemic resilience theory and provides a practical framework for climate-resilient and multi-hazard infrastructure planning in civil engineering.

<https://doi.org/10.63982/dinamika.hee41n91>

Received 24 Mei 2026; Received in revised form 28 Juni 2026; Accepted 30 Juni 2026

Available online 12 May 2021

Pendahuluan

Perubahan iklim global dan peningkatan frekuensi multi-bencana telah meningkatkan tekanan terhadap keberlanjutan infrastruktur kritis serta kapasitas sistem perkotaan dalam mempertahankan kontinuitas layanan esensial di berbagai wilayah dunia. Intensifikasi ancaman hidro-meteorologi, tsunami, banjir, kebakaran hutan, dan gangguan iklim ekstrem menunjukkan bahwa kerentanan infrastruktur tidak lagi bersifat tunggal, melainkan berkembang menjadi risiko yang saling terhubung melalui interdependensi antara sistem air, energi, transportasi, kesehatan, dan jaringan komunikasi (Moreno Flores, 2021; Paredes Gaibor et al., 2024; Villagrán & Soto, 2024). Dalam konteks tersebut, literatur manajemen bencana kontemporer menekankan bahwa efektivitas perencanaan risiko semakin bergantung pada kemampuan mengintegrasikan analisis spasial, tata ruang, infrastruktur hijau, kapasitas sosial, serta mekanisme adaptasi multidimensional untuk merespons dinamika risiko yang semakin kompleks dan tidak linear (Cima Vergara, 2024; Insunza et al., 2023; Quiroz-Del Pezo & Olives-Maldonado, 2023; Rodríguez Rodríguez et al., 2023). Namun demikian, fragmentasi data, keterbatasan kapasitas analitik, dan dominasi pendekatan sektoral masih menjadi kendala utama dalam membangun sistem ketahanan infrastruktur yang adaptif terhadap risiko multi-bahaya.

Kondisi tersebut menempatkan integrasi antara risiko iklim dan risiko bencana sebagai isu strategis dalam bidang teknik sipil dan perencanaan infrastruktur, terutama karena kegagalan satu sistem infrastruktur



dapat memicu gangguan berantai terhadap layanan publik, aktivitas ekonomi, dan keselamatan masyarakat. Berbagai studi menunjukkan bahwa pendekatan penilaian risiko yang dominan saat ini masih berfokus pada hazard tunggal dan evaluasi sektoral, sehingga belum mampu merepresentasikan karakter risiko sistemik, cascading, dan interdependent yang berkembang pada infrastruktur kritis modern (Manrique Rueda et al., 2022; Maskrey et al., 2023; Pescaroli et al., 2023; Prihartanto et al., 2023; Simpson et al., 2021). Meskipun pendekatan GIS multi-hazard, zonasi risiko, dan kerangka 4R telah digunakan untuk mendukung mitigasi dan kesiapsiagaan, implementasinya masih menghadapi keterbatasan dalam mengintegrasikan variabel sosial, dinamika temporal non-linear, kapasitas adaptif, serta keterhubungan lintas sektor energi, transportasi, air, dan komunikasi (Caldera et al., 2021; Mohanty et al., 2020; Schweikert & Deinert, 2021). Akibatnya, prioritas mitigasi sering kali kurang akurat dan kontinuitas operasional infrastruktur menjadi rentan terhadap kegagalan sistemik pada wilayah dengan eksposur multi-bencana tinggi (Das & McAleavy, 2025; Hendricks & Zandt, 2021; Okem et al., 2024).

Sejalan dengan perkembangan tersebut, berbagai penelitian terdahulu telah mengembangkan pendekatan berbasis GIS, multi-hazard assessment, dan Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) untuk mengevaluasi kerentanan infrastruktur terhadap ancaman iklim dan bencana melalui integrasi data spasial, parameter fisik, sosial-ekonomi, serta kapasitas adaptif dalam satu kerangka analisis terstruktur (Gallina et al., 2020; Hussain et al., 2021; Jarghon et al., 2024; Mukhtar et al., 2024). Secara metodologis, GIS digunakan untuk pemetaan spasial dan visualisasi risiko, sedangkan AHP, weighted overlay, entropy weight, dan OWA diterapkan untuk pembobotan indikator hazard, exposure, dan vulnerability pada berbagai konteks multi-bahaya (Küçükarslan et al., 2024; Luu et al., 2020; Nyimbili & Erden, 2020). Temuan empiris menunjukkan bahwa model GIS–MCDA mampu menghasilkan akurasi prediksi yang memadai melalui validasi ROC-AUC serta mendukung penentuan prioritas mitigasi berbasis wilayah (Z. Li et al., 2021; Osman & Das, 2023). Meskipun demikian, sebagian besar studi masih bergantung pada asumsi bobot statis, keterbatasan data historis, dan pendekatan spasial yang belum sepenuhnya menangkap interdependensi antar infrastruktur, dinamika temporal, maupun efek cascading multi-risiko, sehingga kebutuhan terhadap kerangka risiko terpadu yang lebih adaptif dan operasional masih tetap signifikan (Adeyemi et al., 2024; Gallina et al., 2020; Q. Li et al., 2025; Manyaga et al., 2020; Mukhtar et al., 2024).

Keterbatasan tersebut menjadi semakin penting ketika berbagai studi mulai mengembangkan kerangka multi-hazard, system-of-systems, stress testing, dan pemodelan berbasis jaringan untuk meningkatkan analisis risiko infrastruktur kritis secara lebih sistemik. Meskipun pendekatan tersebut memberikan kontribusi penting terhadap pemahaman interdependensi infrastruktur, model yang digunakan masih menunjukkan keterbatasan substansial dalam menangkap interaksi lintas risiko dan efek sistemik secara komprehensif (Linkov et al., 2022; Stanković et al., 2023; Verschuur et al., 2024). Sebagian besar penelitian masih mengevaluasi infrastruktur dalam batas sektoral tertentu sehingga hubungan interdependensi antara energi, transportasi, air, telekomunikasi, dan rantai logistik belum dimodelkan secara operasional maupun empiris dalam konteks multi-risiko yang dinamis (Kaya et al., 2025; Shamsi & Helmrich, 2025; Verschuur et al., 2022). Selain itu, model cascading effects dan stress testing yang tersedia umumnya masih bersifat semi-kuantitatif, berbasis kasus spesifik, dan belum mengintegrasikan variasi spasial, kapasitas adaptif lokal, maupun kebutuhan operasional lintas wilayah secara simultan (Faraji et al., 2025; Santoro et al., 2022). Kondisi ini menyebabkan keterbatasan dalam identifikasi hot spots sistemik, prioritas investasi adaptasi, serta evaluasi dampak sosial-ekonomi terhadap kelompok rentan (Deng & Liu, 2023; Dulin et al., 2025; Pescaroli et al., 2023; Schnittfinke et al., 2024).

Berangkat dari berbagai kesenjangan tersebut, kebutuhan terhadap kerangka analisis risiko yang lebih integratif dan adaptif menjadi semakin mendesak, khususnya untuk mendukung perencanaan ketahanan infrastruktur kritis pada konteks perubahan iklim dan multi-bencana. Dalam kerangka tersebut, penelitian ini

menyusun model risiko terpadu berbasis Resilience Theory dan Integrated Risk Theory untuk meningkatkan efektivitas perencanaan ketahanan infrastruktur kritis terhadap ancaman iklim dan bencana. Secara spesifik, penelitian mengidentifikasi interaksi antara risiko iklim, risiko bencana, kerentanan infrastruktur, serta kapasitas adaptif melalui pendekatan mix methods yang mengintegrasikan analisis spasial GIS dan pembobotan risiko berbasis MCDA. Pendekatan tersebut dipilih karena dinilai mampu menangkap kompleksitas hubungan multi-sektor dan dinamika spasial yang belum terakomodasi secara memadai dalam studi terdahulu yang umumnya masih bersifat parsial dan sektoral (Kobayashi-Carvalhoes & Ahmad, 2023; Luu et al., 2020; Rezaei et al., 2023). Dengan demikian, penelitian ini diarahkan untuk memperluas pemahaman mengenai interaksi lintas-risiko dan implikasinya terhadap perencanaan ketahanan infrastruktur kritis dalam konteks risiko sistemik yang terus berkembang.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan Integrated Risk Framework (IRF) yang mengintegrasikan analisis spasial GIS, pembobotan risiko melalui MCDA, dan pendekatan ketahanan infrastruktur secara simultan untuk menghasilkan model risiko multi-sektor yang lebih komprehensif, adaptif, dan operasional. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya menerapkan GIS–MCDA atau pendekatan ketahanan infrastruktur secara terpisah, studi ini memadukan ketiga komponen tersebut dalam satu kerangka analitis terpadu yang mampu mengevaluasi hubungan antara hazard, exposure, vulnerability, dan kapasitas adaptif lintas sektor secara bersamaan (Afsari et al., 2022; Rivière et al., 2023; Tempa, 2022). Pendekatan ini juga memperkuat integrasi data spasial, penilaian berbasis pakar, dan evaluasi ketahanan sistemik untuk mendukung pengambilan keputusan kebijakan yang lebih responsif terhadap dinamika risiko iklim dan bencana pada sektor air, energi, transportasi, dan kawasan perkotaan (Cheewinsiriwat et al., 2024; Gontte, 2024; Rajarethinam & Devadas, 2021). Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi metodologis dan empiris terhadap pengembangan kerangka perencanaan infrastruktur yang lebih resilien, lintas-sektor, dan berbasis risiko terpadu.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan mix methods sequential explanatory yang mengintegrasikan analisis kuantitatif dan kualitatif secara bertahap untuk menyusun Integrated Climate and Disaster Risk Framework dalam perencanaan ketahanan infrastruktur kritis. Pendekatan ini dipilih karena penelitian tidak hanya bertujuan mengukur tingkat risiko secara kuantitatif, tetapi juga memahami hubungan interdependensi antar-risiko dan validitas operasional model dalam konteks kebijakan dan praktik lapangan. Kerangka konseptual penelitian dibangun berdasarkan Resilience Theory dan Integrated Risk Theory dengan struktur hubungan variabel yang terdiri atas Risiko Iklim (Climate Risk, X_1), Risiko Bencana (Disaster Risk, X_2), Kerentanan Infrastruktur (Infrastructure Vulnerability, M), Kapasitas Adaptif (Adaptive Capacity, Z), dan Ketahanan Infrastruktur Kritis (Critical Infrastructure Resilience, Y).

Alur penelitian terdiri atas sembilan tahapan utama, yaitu: (1) identifikasi infrastruktur kritis; (2) pengumpulan data kuantitatif dan spasial; (3) analisis risiko sektoral; (4) standardisasi dan integrasi data; (5) pembobotan risiko berbasis MCDA; (6) analisis spasial GIS; (7) pengujian hubungan antar variabel menggunakan SEM-PLS; (8) validasi model melalui expert judgment dan sensitivity analysis; serta (9) penyusunan Integrated Risk Framework (IRF). Pendekatan ini dirancang untuk membuktikan bahwa model risiko terpadu menghasilkan prioritas mitigasi dan identifikasi hotspot risiko yang lebih akurat dibanding pendekatan sektoral konvensional.

Objek penelitian mencakup lima kategori infrastruktur kritis yang memiliki tingkat eksposur tinggi terhadap ancaman iklim dan bencana, yaitu sistem air bersih, jaringan jalan dan jembatan, fasilitas kesehatan,

sistem energi/listrik, dan jaringan telekomunikasi. Infrastruktur tersebut dipilih karena memiliki fungsi strategis dalam menjaga kontinuitas layanan publik dan menunjukkan tingkat interdependensi tinggi terhadap gangguan multi-bencana.

Wilayah studi ditentukan berdasarkan tingkat kerawanan multi-hazard dan kepadatan infrastruktur kritis pada kawasan perkotaan dan peri-urban yang memiliki eksposur terhadap banjir, longsor, kekeringan, serta gangguan hidro-meteorologi. Data spasial diperoleh dalam format raster dan vektor menggunakan sistem koordinat Universal Transverse Mercator (UTM). Material penelitian meliputi data curah hujan historis, data temperatur, peta bahaya bencana, data topografi, data tata guna lahan, data jaringan infrastruktur, serta data sosial-ekonomi wilayah.

Sumber data utama mencakup BMKG untuk data klimatologi dan curah hujan ekstrem, BNPB dan InaRISK untuk data kejadian bencana dan indeks multi-hazard, serta instansi teknis daerah untuk data operasional infrastruktur. Selain itu, penelitian menggunakan citra satelit resolusi menengah dan data DEM (Digital Elevation Model) untuk mendukung analisis spasial dan pemetaan hotspot risiko.

Pengumpulan data dilakukan melalui kombinasi survei lapangan, observasi teknis, analisis spasial, dokumentasi visual, wawancara semi-terstruktur, serta Focus Group Discussion (FGD). Teknik purposive sampling digunakan untuk menentukan lokasi infrastruktur yang memiliki tingkat eksposur tinggi terhadap ancaman iklim dan bencana. Responden penelitian terdiri atas akademisi, operator infrastruktur, instansi kebencanaan, dinas pekerjaan umum, serta pakar mitigasi risiko.

Data Risiko Iklim (X1) dikumpulkan melalui data time-series curah hujan ekstrem, perubahan temperatur, intensitas kekeringan, dan perubahan pola musim selama periode pengamatan 20 tahun terakhir. Data Risiko Bencana (X2) diperoleh melalui peta banjir, longsor, gempa bumi, riwayat kerusakan, serta multi-hazard exposure index. Data Kerentanan Infrastruktur (M) diperoleh melalui inspeksi teknis lapangan yang mencakup kondisi fisik, usia infrastruktur, kualitas material, redundansi sistem, dan sensitivitas layanan.

Kapasitas Adaptif (Z) diukur menggunakan instrumen kuesioner berbasis skala Likert lima tingkat yang mengevaluasi kesiapan kelembagaan, sistem peringatan dini, anggaran mitigasi, teknologi monitoring, dan kecepatan respons darurat. Sementara itu, data Ketahanan Infrastruktur Kritis (Y) dikumpulkan melalui data recovery time, kontinuitas layanan, stabilitas operasional, dan catatan gangguan layanan historis.

Observasi lapangan dilakukan secara sistematis pada seluruh objek infrastruktur menggunakan protokol inspeksi teknis berbasis indikator kerentanan dan ketahanan. Dokumentasi visual dilakukan menggunakan UAV (Unmanned Aerial Vehicle) untuk memperoleh citra kondisi fisik infrastruktur, daerah rawan longsor, area banjir, dan pola kerusakan spasial.

Setiap infrastruktur dievaluasi berdasarkan lima parameter utama, yaitu tingkat eksposur, sensitivitas struktural, kapasitas pemulihan, redundansi layanan, dan potensi gangguan berantai. Pengukuran kerusakan fisik dilakukan menggunakan condition assessment index, sedangkan tingkat kontinuitas layanan dianalisis melalui catatan operasional dan gangguan sistem.

FGD dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama bertujuan mengidentifikasi indikator risiko dan validasi hubungan antar variabel. Tahap kedua digunakan untuk menentukan prioritas mitigasi dan memvalidasi hasil model risiko terpadu. Seluruh proses pengumpulan data mengikuti prosedur triangulasi sumber untuk meningkatkan reliabilitas dan konsistensi informasi.

Analisis penelitian dilakukan melalui empat pendekatan utama, yaitu analisis sektoral, integrasi risiko berbasis MCDA-GIS, pemodelan hubungan antar variabel, dan simulasi skenario risiko.

Pada tahap awal, dilakukan analisis risiko sektoral secara parsial untuk mengevaluasi kelemahan pendekatan konvensional. Risiko banjir, longsor, dan gangguan iklim dianalisis secara terpisah pada masing-masing sektor infrastruktur. Tahap ini digunakan sebagai pembandingan terhadap model risiko terpadu.

Selanjutnya, seluruh variabel distandardisasi menggunakan metode Min-Max Normalization untuk menghasilkan rentang nilai:

$$0 \leq X \leq 1$$

Pembobotan indikator dilakukan menggunakan Analytic Hierarchy Process (AHP), Fuzzy AHP, dan TOPSIS untuk mengurangi bias subjektivitas dalam penentuan bobot variabel. Konsistensi matriks AHP diuji menggunakan Consistency Ratio (CR) dengan batas toleransi $\leq 0,10$.

Analisis spasial dilakukan menggunakan GIS berbasis weighted overlay analysis untuk menghasilkan peta risiko terpadu. Analisis ini digunakan untuk mengidentifikasi hotspot risiko, wilayah kritis, serta interaksi multi-bahaya pada sektor infrastruktur yang berbeda.

Hubungan antar variabel diuji menggunakan Structural Equation Modeling–Partial Least Squares (SEM-PLS). Analisis ini digunakan untuk menguji pengaruh Risiko Iklim (X1) dan Risiko Bencana (X2) terhadap Kerentanan Infrastruktur (M), serta pengaruh moderasi Kapasitas Adaptif (Z) terhadap Ketahanan Infrastruktur (Y). Evaluasi model dilakukan menggunakan nilai path coefficient, R^2 , effect size (f^2), dan predictive relevance (Q^2).

Validasi model dilakukan melalui tiga tahapan, yaitu validasi statistik, validasi pakar, dan sensitivity analysis. Validasi statistik dilakukan dengan membandingkan hasil model terhadap data kejadian historis dan gangguan infrastruktur aktual. Validasi spasial dilakukan menggunakan overlay antara hotspot risiko dan lokasi kerusakan historis.

Validasi pakar dilakukan menggunakan metode Delphi yang melibatkan akademisi, praktisi kebencanaan, dan operator infrastruktur. Para pakar mengevaluasi kesesuaian indikator, relevansi bobot risiko, serta akurasi hubungan antar variabel dalam model.

Selain itu, sensitivity analysis dilakukan dengan mengubah bobot indikator sebesar $\pm 10\%$ untuk menguji stabilitas model risiko terpadu terhadap perubahan parameter. Model dianggap robust apabila perubahan bobot tidak menghasilkan perubahan signifikan pada prioritas hotspot risiko dan indeks ketahanan.

Analisis statistik dilakukan menggunakan perangkat lunak SmartPLS, ArcGIS, dan SPSS. Statistik deskriptif digunakan untuk mengevaluasi distribusi data, rerata, simpangan baku, dan pola kerentanan infrastruktur. Uji reliabilitas dilakukan menggunakan Cronbach's Alpha dan Composite Reliability dengan nilai minimum 0,70.

Uji validitas konstruk dilakukan melalui Average Variance Extracted (AVE) dan discriminant validity. Untuk mengurangi kesalahan pengukuran, dilakukan pemeriksaan data hilang, deteksi outlier menggunakan Mahalanobis distance, serta pengujian normalitas data. Kesalahan spasial diminimalkan melalui koreksi georeferensi dan verifikasi koordinat lapangan.

Penelitian ini memperhatikan prinsip etika penelitian dengan memastikan bahwa seluruh responden memberikan persetujuan partisipasi secara sukarela. Data kelembagaan dan operasional infrastruktur yang bersifat sensitif dianonimkan untuk menjaga kerahasiaan informasi. Seluruh proses wawancara dan FGD dilakukan sesuai prinsip transparansi, akuntabilitas, dan non-maleficence.

Meskipun penelitian ini mengintegrasikan GIS, MCDA, dan SEM dalam satu kerangka terpadu, beberapa keterbatasan tetap terdapat dalam penelitian. Pertama, kualitas model sangat dipengaruhi oleh

ketersediaan dan resolusi data spasial historis. Kedua, pembobotan MCDA masih memiliki potensi subjektivitas meskipun telah dikurangi melalui metode Delphi dan sensitivity analysis. Ketiga, model interdependensi infrastruktur belum sepenuhnya mampu merepresentasikan dinamika temporal jangka panjang akibat perubahan iklim ekstrem.

Selain itu, hasil penelitian memiliki keterbatasan dalam generalisasi lintas wilayah karena karakteristik geografis, kapasitas kelembagaan, dan kondisi sosial-ekonomi yang berbeda antar daerah. Namun demikian, kerangka metodologis yang dikembangkan tetap menyediakan pendekatan yang sistematis, adaptif, dan dapat direplikasi untuk pengembangan model ketahanan infrastruktur berbasis risiko terpadu pada konteks multi-bencana dan perubahan iklim.

Hasil dan Pembahasan

Hasil

Penelitian ini menghasilkan suatu *Integrated Climate and Disaster Risk Framework* berbasis GIS–MCDA untuk mengevaluasi tingkat risiko dan ketahanan infrastruktur kritis terhadap ancaman iklim dan bencana. Analisis dilakukan pada lima sektor infrastruktur utama, yaitu sistem air bersih, transportasi, energi, fasilitas kesehatan, dan telekomunikasi. Model risiko terpadu dibangun melalui integrasi variabel risiko iklim, risiko bencana, kapasitas adaptif, sensitivitas infrastruktur, dan eksposur spasial menggunakan pendekatan *weighted overlay analysis* dan SEM-PLS. Hasil analisis menunjukkan bahwa pendekatan terpadu menghasilkan distribusi risiko yang berbeda dibandingkan model sektoral konvensional. Nilai indeks risiko komposit berkisar antara 0,51–0,81 pada skala normalisasi 0–1. Infrastruktur air bersih menunjukkan skor risiko tertinggi sebesar 0,81, sedangkan telekomunikasi menunjukkan skor terendah sebesar 0,51. Distribusi spasial risiko memperlihatkan konsentrasi kerentanan tertinggi pada kawasan dataran rendah padat penduduk dan wilayah lereng dengan intensitas curah hujan ekstrem tinggi.

Analisis deskriptif awal menunjukkan bahwa variabel risiko iklim dan risiko bencana memiliki tingkat eksposur yang berbeda antar sektor infrastruktur. Infrastruktur air bersih memiliki skor risiko iklim sebesar 0,88 dan skor risiko bencana sebesar 0,79, sedangkan sektor telekomunikasi menunjukkan skor risiko iklim sebesar 0,56 dan risiko bencana sebesar 0,52. Variasi tersebut diikuti oleh perbedaan kapasitas adaptif antar sektor yang berkisar antara 0,42–0,67. Nilai kapasitas adaptif tertinggi ditemukan pada sektor telekomunikasi, sedangkan sektor air bersih menunjukkan nilai terendah. Hasil integrasi seluruh parameter menghasilkan skor risiko terpadu sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Skor Risiko Terpadu Infrastruktur Kritis

Infrastruktur	Risiko Iklim	Risiko Bencana	Kapasitas Adaptif	Skor Risiko Terpadu
Air Bersih	0,88	0,79	0,42	0,81
Transportasi	0,74	0,71	0,51	0,69
Energi	0,69	0,66	0,57	0,64
Kesehatan	0,61	0,58	0,63	0,57
Telekomunikasi	0,56	0,52	0,67	0,51

Perbandingan antar sektor menunjukkan bahwa sektor air bersih dan transportasi memiliki tingkat kerentanan lebih tinggi dibandingkan sektor lainnya. Infrastruktur air bersih mencatat rerata skor kerentanan sebesar 0,81 dengan simpangan baku 0,07, sedangkan sektor transportasi menunjukkan rerata 0,69 dengan simpangan baku 0,05. Infrastruktur energi dan kesehatan menunjukkan tingkat kerentanan menengah dengan skor masing-masing sebesar 0,64 dan 0,57. Sementara itu, sektor telekomunikasi menunjukkan tingkat kerentanan paling rendah dengan rerata 0,51 dan simpangan baku 0,04. Hasil uji ANOVA menunjukkan adanya perbedaan signifikan antar sektor infrastruktur dengan nilai F sebesar 8,73 dan tingkat signifikansi $p < 0,01$. Nilai *effect size* sebesar $\eta^2 = 0,41$ menunjukkan bahwa variasi jenis infrastruktur berkontribusi moderat hingga kuat terhadap perubahan tingkat risiko terpadu.

Analisis pembobotan MCDA menunjukkan bahwa eksposur bencana merupakan indikator dengan kontribusi tertinggi terhadap pembentukan indeks risiko terpadu. Nilai bobot eksposur bencana tercatat sebesar 0,28, diikuti sensitivitas infrastruktur sebesar 0,24 dan kapasitas adaptif sebesar 0,20. Redundansi sistem dan riwayat kerusakan masing-masing memiliki bobot sebesar 0,16 dan 0,12. Distribusi bobot tersebut menunjukkan bahwa parameter spasial dan kondisi fisik infrastruktur memiliki pengaruh dominan dalam pembentukan skor kerentanan.

Tabel 2. Hasil Pembobotan Kerentanan Infrastruktur

Indikator	Bobot
Eksposur Bencana	0,28
Sensitivitas Infrastruktur	0,24
Kapasitas Adaptif	0,20
Redundansi Sistem	0,16
Riwayat Kerusakan	0,12

Visualisasi spasial hasil overlay GIS menunjukkan bahwa hotspot risiko terkonsentrasi pada kawasan dataran rendah dengan kepadatan penduduk tinggi serta wilayah lereng dengan curah hujan tahunan tinggi. Zona dengan kombinasi paparan banjir dan longsor menunjukkan skor risiko spasial lebih besar dibandingkan wilayah dengan kapasitas adaptif tinggi. Peta distribusi risiko memperlihatkan bahwa konsentrasi kerentanan tertinggi berada pada jaringan distribusi air bersih dan koridor transportasi utama. Sebaliknya, wilayah dengan sistem redundansi infrastruktur lebih tinggi menunjukkan skor risiko relatif lebih rendah. Hasil overlay spasial juga memperlihatkan bahwa infrastruktur yang berada pada radius kurang dari 2 km dari area rawan banjir memiliki peningkatan skor kerentanan rata-rata sebesar 21% dibandingkan wilayah dengan eksposur rendah.

Grafik 1. Distribusi Tingkat Risiko Infrastruktur Kritis



Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa penerapan mitigasi terintegrasi menghasilkan penurunan kerugian infrastruktur sebesar 34% dibandingkan pendekatan parsial. Pada skenario tanpa integrasi mitigasi, indeks kerugian infrastruktur dinormalisasi pada nilai 100%. Implementasi mitigasi parsial menurunkan indeks

kerugian menjadi 78%, sedangkan mitigasi terintegrasi menurunkannya menjadi 66%. Penurunan terbesar ditemukan pada sektor air bersih dan transportasi, terutama pada wilayah dengan peningkatan kapasitas adaptif dan pengurangan eksposur spasial. Simulasi juga menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas adaptif sebesar 20% menghasilkan penurunan skor risiko rata-rata sebesar 18% pada sektor energi dan transportasi.

Grafik 2. Penurunan Kerugian Infrastruktur Berdasarkan Skenario Mitigasi



Hasil validasi model menunjukkan bahwa kerangka risiko terpadu memiliki tingkat konsistensi dan akurasi yang memadai untuk analisis multi-risiko. Nilai *Consistency Ratio* (CR) pada pembobotan AHP berada di bawah batas toleransi 0,10 untuk seluruh matriks perbandingan. Evaluasi model SEM-PLS menunjukkan nilai *path coefficient* positif pada hubungan antara risiko iklim dan kerentanan infrastruktur sebesar $\beta = 0,71$, serta hubungan antara risiko bencana dan kerentanan sebesar $\beta = 0,66$ dengan tingkat signifikansi $p < 0,05$. Nilai R^2 model sebesar 0,68 menunjukkan bahwa variasi ketahanan infrastruktur dapat dijelaskan sebesar 68% oleh variabel risiko iklim, risiko bencana, kapasitas adaptif, dan kerentanan infrastruktur. Selain itu, nilai *predictive relevance* (Q^2) sebesar 0,53 menunjukkan kemampuan prediktif model yang tinggi.

Uji sensitivitas memperlihatkan bahwa model memiliki respons yang berbeda terhadap perubahan parameter kapasitas adaptif dan redundansi sistem. Peningkatan bobot kapasitas adaptif sebesar $\pm 10\%$ menghasilkan perubahan skor risiko rata-rata sebesar 6–9% pada seluruh sektor. Infrastruktur transportasi dan energi menunjukkan sensitivitas tertinggi terhadap perubahan kapasitas adaptif, sedangkan telekomunikasi menunjukkan perubahan paling rendah. Variasi bobot eksposur bencana sebesar $\pm 10\%$ menghasilkan perubahan identifikasi hotspot spasial pada tiga wilayah prioritas risiko tinggi. Namun demikian, struktur umum distribusi risiko tetap konsisten pada seluruh skenario pengujian, menunjukkan stabilitas model terhadap variasi parameter input.

Penelitian ini juga mengidentifikasi lima prioritas mitigasi utama berdasarkan kombinasi tingkat risiko, urgensi layanan publik, dan efektivitas intervensi adaptif. Prioritas tertinggi diberikan pada penguatan sistem distribusi air bersih dan peningkatan drainase kawasan rawan banjir. Penguatan lereng dan stabilisasi tanah berada pada kategori prioritas tinggi, diikuti redundansi jaringan energi dan integrasi sistem peringatan dini berbasis GIS. Hasil prioritas mitigasi ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Prioritas Mitigasi Infrastruktur Kritis

Prioritas	Strategi Mitigasi	Tingkat Prioritas
1	Penguatan sistem distribusi air bersih	Sangat Tinggi
2	Peningkatan drainase kawasan rawan banjir	Sangat Tinggi
3	Penguatan lereng dan stabilisasi tanah	Tinggi
4	Redundansi jaringan energi	Tinggi
5	Integrasi sistem peringatan dini berbasis GIS	Menengah–Tinggi

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan *Integrated Climate and Disaster Risk Framework* mampu mengidentifikasi variasi risiko, pola spasial kerentanan, dan prioritas mitigasi infrastruktur kritis secara terukur. Infrastruktur air bersih menunjukkan skor risiko tertinggi sebesar 0,81,

sedangkan telekomunikasi menunjukkan skor terendah sebesar 0,51. Simulasi mitigasi terintegrasi menghasilkan penurunan kerugian sebesar 34%, sementara peningkatan kapasitas adaptif sebesar 20% menurunkan skor risiko rata-rata sebesar 18%. Selain itu, model menunjukkan performa statistik yang memadai melalui nilai η^2 sebesar 0,41, nilai R^2 sebesar 0,68, dan nilai Q^2 sebesar 0,53.

Diskusi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan *Integrated Climate and Disaster Risk Framework* (IRF) mampu mengidentifikasi interaksi kompleks antara risiko iklim, risiko bencana, kerentanan infrastruktur, dan kapasitas adaptif secara lebih komprehensif dibandingkan pendekatan sektoral konvensional. Temuan utama berupa tingginya skor risiko sektor air bersih (0,81), perbedaan signifikan tingkat kerentanan antar sektor ($F = 8,73$; $p < 0,01$), serta penurunan kerugian infrastruktur sebesar 34% pada skenario mitigasi terintegrasi menunjukkan bahwa risiko infrastruktur kritis bersifat multidimensional, sistemik, dan saling terhubung. Temuan ini secara langsung menguatkan prinsip utama *Integrated Risk Theory* yang menyatakan bahwa ancaman iklim dan bencana tidak bekerja secara independen, melainkan menghasilkan efek *cascading* melalui keterkaitan antar sistem infrastruktur (Pescaroli et al., 2022; Simpson et al., 2021). Dalam konteks teknik sipil, hubungan tersebut terlihat pada bagaimana gangguan hidrometeorologi tidak hanya meningkatkan kerusakan fisik jaringan air bersih, tetapi juga mempengaruhi kontinuitas layanan transportasi, energi, dan fasilitas kesehatan secara simultan.

Dominannya risiko pada sektor air bersih menunjukkan bahwa infrastruktur dengan ketergantungan tinggi terhadap stabilitas hidrologi memiliki sensitivitas lebih besar terhadap perubahan iklim dan multi-bencana. Secara teknis, sistem distribusi air memiliki karakteristik jaringan linear dengan ketergantungan tinggi terhadap tekanan hidraulik, kualitas sumber air, dan stabilitas energi pendukung. Ketika curah hujan ekstrem meningkat, sistem drainase dan pengolahan air mengalami peningkatan beban operasional, sementara banjir dan longsor memperbesar potensi kerusakan jaringan distribusi. Kondisi tersebut menjelaskan mengapa sektor air bersih menunjukkan skor risiko tertinggi dibanding sektor lain. Temuan ini konsisten dengan penelitian Gaibor et al. (2024) yang menunjukkan bahwa infrastruktur air merupakan salah satu sistem paling rentan terhadap kejadian ENSO dan gangguan hidro-meteorologi. Hasil penelitian ini juga memperluas temuan Villagrán dan Soto (2024) yang menegaskan bahwa kerusakan pada jaringan air dapat mempercepat gangguan layanan publik lain melalui efek interdependensi spasial.

Selain itu, hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas adaptif memiliki pengaruh signifikan dalam menurunkan tingkat risiko total. Infrastruktur telekomunikasi menunjukkan skor risiko lebih rendah meskipun memiliki eksposur iklim relatif tinggi, karena sektor tersebut memiliki redundansi sistem dan fleksibilitas jaringan yang lebih baik. Dalam perspektif *Resilience Theory*, kapasitas adaptif merupakan mekanisme utama yang menentukan kemampuan sistem untuk menyerap gangguan, mempertahankan fungsi operasional, dan mempercepat pemulihan setelah bencana (Maskrey et al., 2023). Temuan ini mendukung studi Mohanty et al. (2020) dan Schweikert dan Deinert (2021) yang menekankan pentingnya konsep *robustness*, *redundancy*, *resourcefulness*, dan *rapidity* (4R) dalam meningkatkan ketahanan infrastruktur kritis. Namun demikian, penelitian ini memperluas kerangka tersebut dengan menunjukkan bahwa kapasitas adaptif tidak hanya berfungsi sebagai elemen teknis, tetapi juga sebagai faktor moderasi yang mempengaruhi hubungan antara risiko dan ketahanan sistem secara simultan.

Hasil pembobotan MCDA menunjukkan bahwa eksposur bencana memiliki bobot tertinggi sebesar 0,28, diikuti sensitivitas infrastruktur sebesar 0,24. Temuan ini menunjukkan bahwa posisi geografis dan tingkat paparan multi-bencana masih menjadi determinan dominan dalam pembentukan risiko infrastruktur. Secara spasial, wilayah dataran rendah padat penduduk dan area lereng dengan curah hujan tinggi menunjukkan

itu, perencanaan infrastruktur perlu mengintegrasikan data iklim, peta multi-bencana, kapasitas adaptif, dan hubungan antar sistem dalam satu kerangka pengambilan keputusan. Dalam praktik teknik sipil, hal ini berarti bahwa desain jaringan air, transportasi, dan energi tidak dapat lagi dilakukan secara independen, melainkan harus mempertimbangkan potensi gangguan lintas sektor dan kebutuhan redundansi sistem. Temuan ini relevan bagi pengembangan *climate-resilient infrastructure* pada kawasan perkotaan padat dan wilayah rawan bencana.



Grafik 2. Efektivitas Mitigasi Terintegrasi terhadap Penurunan Kerugian

Meskipun penelitian ini menunjukkan performa model yang kuat, beberapa anomali dan deviasi hasil tetap ditemukan. Infrastruktur energi menunjukkan sensitivitas yang lebih rendah dibanding prediksi awal meskipun memiliki ketergantungan tinggi terhadap gangguan iklim. Kondisi ini menunjukkan adanya pengaruh redundansi jaringan dan sistem cadangan energi yang belum sepenuhnya terwakili dalam indikator eksposur spasial. Selain itu, beberapa wilayah dengan tingkat bahaya tinggi menunjukkan skor risiko moderat akibat kapasitas adaptif lokal yang relatif baik. Variasi tersebut menunjukkan bahwa hubungan antara eksposur dan ketahanan tidak bersifat linear, melainkan dipengaruhi oleh kombinasi faktor sosial, teknis, dan operasional.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pertama, resolusi data historis dan spasial yang digunakan masih terbatas pada skala regional sehingga belum mampu merepresentasikan variasi mikro-spasial secara detail. Kedua, pembobotan MCDA tetap memiliki unsur subjektivitas meskipun telah divalidasi melalui *expert judgment* dan uji sensitivitas. Ketiga, model belum sepenuhnya memasukkan dinamika temporal jangka panjang seperti perubahan penggunaan lahan dan proyeksi iklim ekstrem masa depan. Selain itu, generalisasi model ke wilayah lain perlu dilakukan secara hati-hati karena karakteristik geografis, kapasitas institusional, dan kondisi sosial-ekonomi setiap wilayah berbeda.

Berdasarkan keterbatasan tersebut, penelitian lanjutan perlu mengembangkan integrasi *machine learning*, *real-time monitoring*, dan *digital twin infrastructure* untuk meningkatkan akurasi prediksi risiko dan simulasi ketahanan jangka panjang. Penelitian mendatang juga perlu mengevaluasi interaksi risiko pada skala metropolitan dan regional dengan memasukkan dinamika perubahan iklim masa depan, ketidakpastian kebijakan, serta perilaku masyarakat dalam kondisi darurat. Selain itu, pengembangan model probabilistik berbasis *dynamic network analysis* berpotensi meningkatkan kemampuan identifikasi *cascading effects* antar infrastruktur secara lebih detail.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah penting terhadap perkembangan ilmu teknik sipil global melalui pengembangan *Integrated Risk Framework* yang mengintegrasikan GIS, MCDA, dan pendekatan ketahanan infrastruktur dalam satu sistem analisis terpadu. Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa risiko infrastruktur kritis bersifat sistemik, lintas sektor, dan dipengaruhi secara simultan oleh ancaman iklim, bencana, kerentanan, serta kapasitas adaptif. Selain memperkuat landasan teoritis *Resilience Theory* dan *Integrated Risk Theory*, penelitian ini juga menyediakan kerangka praktis yang dapat digunakan untuk mendukung pengambilan keputusan perencanaan infrastruktur tahan iklim dan multi-bencana secara lebih adaptif, terukur, dan berbasis risiko.

Simpulan

Penelitian ini bertujuan menyusun *Integrated Climate and Disaster Risk Framework* berbasis *Resilience Theory* dan *Integrated Risk Theory* untuk meningkatkan efektivitas perencanaan ketahanan infrastruktur kritis terhadap ancaman iklim dan bencana melalui integrasi GIS, MCDA, dan pendekatan ketahanan infrastruktur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan risiko terpadu mampu mengidentifikasi interaksi kompleks antara risiko iklim, risiko bencana, kerentanan infrastruktur, dan kapasitas adaptif secara lebih komprehensif dibandingkan pendekatan sektoral konvensional. Temuan empiris memperlihatkan bahwa infrastruktur air bersih merupakan sektor dengan tingkat risiko tertinggi akibat kombinasi eksposur multi-bencana, sensitivitas sistem, dan kapasitas adaptif yang rendah. Selain itu, hasil analisis menunjukkan bahwa kapasitas adaptif dan redundansi sistem memiliki peran signifikan dalam menurunkan tingkat risiko total, sementara simulasi mitigasi terintegrasi menghasilkan penurunan kerugian infrastruktur yang lebih besar dibandingkan model mitigasi parsial. Penelitian ini juga berhasil mengidentifikasi prioritas mitigasi berbasis hotspot spasial dan interdependensi antar sektor infrastruktur.

Secara ilmiah, penelitian ini memberikan tiga kontribusi utama. Pertama, penelitian memperluas pengembangan *Resilience Theory* dan *Integrated Risk Theory* dengan menunjukkan bahwa risiko infrastruktur kritis bersifat sistemik, lintas sektor, dan dipengaruhi secara simultan oleh interaksi ancaman iklim, bencana, kerentanan, serta kapasitas adaptif. Kedua, penelitian menawarkan kontribusi metodologis melalui pengembangan kerangka analisis terpadu yang menggabungkan GIS, MCDA, dan SEM-PLS dalam satu model risiko multi-sektor yang adaptif dan operasional. Ketiga, penelitian menyediakan bukti empiris bahwa pendekatan mitigasi terintegrasi mampu meningkatkan akurasi identifikasi hotspot risiko dan efektivitas perencanaan ketahanan infrastruktur. Implikasi praktis penelitian ini relevan bagi bidang teknik sipil dan rekayasa infrastruktur, khususnya dalam penguatan desain sistem air, redundansi jaringan energi, pengembangan infrastruktur tahan iklim, serta optimalisasi perencanaan mitigasi berbasis risiko spasial. Meskipun demikian, penelitian masih memiliki keterbatasan pada resolusi data spasial, subjektivitas pembobotan MCDA, dan keterbatasan representasi dinamika temporal jangka panjang. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk mengintegrasikan *machine learning*, *digital twin infrastructure*, dan analisis jaringan dinamis berbasis data real-time guna meningkatkan akurasi prediksi risiko serta pemodelan *cascading effects* pada sistem infrastruktur multi-sektor di masa depan.

Daftar Pustaka

- Adeyemi, A. B., Komolafe, A. A., Nakalembe, C. L., Ismaila, R. O., Adebayo, A. D., & Babayemi, O. E. (2024). *Integrated GIS-Based MCDA and Machine Learning Techniques in Flood Susceptibility Mapping in Ala River Basin, Nigeria*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4863685/v1>
- Afsari, R., Nadizadeh Shorabeh, S., Kouhnavard, M., Homae, M., & Arsanjani, J. J. (2022). A Spatial Decision Support Approach for Flood Vulnerability Analysis in Urban Areas: A Case Study of Tehran. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(7), 380. <https://doi.org/10.3390/ijgi11070380>
- Caldera, S., Mostafa, S., Desha, C., & Mohamed, S. (2021). Integrating disaster management planning into road infrastructure asset management. *Infrastructure Asset Management*, 8(4), 219–233. <https://doi.org/10.1680/jinam.21.00012>
- Cheewinsiriwat, P., Langkulsen, U., Lertwattanamongkol, V., Poompongthai, W., Lambonmung, A., Chamchan, C., Boonmanunt, S., Nakhapakorn, K., & Moses, C. (2024). Assessing Coastal Vulnerability to Climate Change: A Case Study of Nakhon Si Thammarat and Krabi. *Social Sciences*, 13(3), 142. <https://doi.org/10.3390/socsci13030142>

- Cima Vergara, M. A. (2024). Vulnerabilidad del Área Metropolitana de Valparaíso ante incendios. *Revista Planeo*, 58. <https://doi.org/10.7764/plan.058.135>
- Das, A., & McAleavy, T. (2025). *Unfolding Cascading Disasters: Navigating Complex Risks and Systemic Vulnerabilities for Coordinated Disaster Response*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-7419302/v1>
- Deng, H., & Liu, K. (2023). Spatiotemporal Evolution of Urban Resilience and Spatial Spillover Effects in Guangdong Province, China. *Land*, 12(9), 1800. <https://doi.org/10.3390/land12091800>
- Dulin, S., Mitoulis, S.-A., Bredikhin, A., Treyz, E., Leung, B., Dykes, J., Karpeles, O., Gurav, S., Karhunen, A., & Linkov, I. (2025). Rethinking infrastructure design from component failure to systemic resilience. *Nature Communications*, 16(1), 9681. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-64683-6>
- Faraji, F., Mouratidis, H., & Zakwani, A. Al. (2025). *Risk Impact Pathway Analysis (RIPA): A Dynamic Risk Assessment Framework for Interdependent Critical Infrastructures*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-8001498/v1>
- Gallina, V., Torresan, S., Zabeo, A., Critto, A., Glade, T., & Marcomini, A. (2020). A Multi-Risk Methodology for the Assessment of Climate Change Impacts in Coastal Zones. *Sustainability*, 12(9), 3697. <https://doi.org/10.3390/su12093697>
- Gontte, A. (2024). Review on Potential Urban Development Site Selection Using Geospatial-Based Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) Techniques in the Context of Ethiopia. *Science Frontiers*, 5(3), 102–109. <https://doi.org/10.11648/j.sf.20240503.11>
- Hendricks, M. D., & Zandt, S. V. (2021). Unequal Protection Revisited: Planning for Environmental Justice, Hazard Vulnerability, and Critical Infrastructure in Communities of Color. *Environmental Justice*, 14(2), 87–97. <https://doi.org/10.1089/env.2020.0054>
- Hussain, M., Tayyab, M., Zhang, J., Shah, A. A., Ullah, K., Mehmood, U., & Al-Shaibah, B. (2021). GIS-Based Multi-Criteria Approach for Flood Vulnerability Assessment and Mapping in District Shangla: Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Sustainability*, 13(6), 3126. <https://doi.org/10.3390/su13063126>
- Insunza, J., Jiménez, A., & Cerda, C. (2023). Resiliencia urbana multidimensional en contextos de riesgo: estrategias para el Programa “Quiero Mi Barrio” desde el caso “Barrio Olga Leiva” en Peñalolén. *EURE*, 50(149). <https://doi.org/10.7764/EURE.50.149.10>
- Jarghon, A. E. M., Damayanti, N. A., Dhamanti, I., Notobroto, H. B., Hidajah, A. C., & Awad, A. M. M. (2024). Mapping Vulnerability to Potential Crisis Events in Surabaya City: A GIS-Based Approach. *F1000Research*, 13, 465. <https://doi.org/10.12688/f1000research.145182.2>
- Kaya, H. D., Schraven, D., Leijten, M., & Chan, P. W. (2025). Unveiling Interdependencies in Infrastructure Transitions: Cross-sectoral Learning in the Water-Energy Nexus. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1554(1), 012140. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1554/1/012140>
- Kobayashi-Carvalhoes, T., & Ahmad, N. (2023). *Initial Systems-Level Assessment of a Distributed Direct Air Capture System Concept at the Urban-scale (UrbanDAC)*. <https://doi.org/10.2172/1997609>
- Küçükarslan, A. B., Köksal, M., & Ekmekçi, İ. (2024). The Use of Geographic Information Systems and Multi-Criteria Decision-Making Methods in the Creation of Forest Fire Susceptibility Maps: A Literature Review. *İnsan ve Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(2), 259–285. <https://doi.org/10.53048/johass.1566294>
- Li, Q., Ni, T., Li, L., Wen, H., & Xu, J. (2025). A probabilistic GIS-based framework for urban flood risk

- assessment in Chengdu metro network. *Scientific Reports*, 15(1), 43526.
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-27456-1>
- Li, Z., Song, K., & Peng, L. (2021). Flood Risk Assessment under Land Use and Climate Change in Wuhan City of the Yangtze River Basin, China. *Land*, 10(8), 878. <https://doi.org/10.3390/land10080878>
- Linkov, I., Trump, B. D., Trump, J., Pescaroli, G., Hynes, W., Mavrodieva, A., & Panda, A. (2022). Resilience stress testing for critical infrastructure. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 82, 103323. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103323>
- Luu, C., Tran, H. X., Pham, B. T., Al-Ansari, N., Tran, T. Q., Duong, N. Q., Dao, N. H., Nguyen, L. P., Nguyen, H. D., Thu Ta, H., Le, H. Van, & Meding, J. von. (2020). Framework of Spatial Flood Risk Assessment for a Case Study in Quang Binh Province, Vietnam. *Sustainability*, 12(7), 3058. <https://doi.org/10.3390/su12073058>
- Manrique Rueda, G., Dupont, B., & Shearing, C. (2022). *Resilient infrastructure in the Anthropocene*. <https://doi.org/10.31124/advance.19300073>
- Manyaga, F., Nilufer, N., & Hajaoui, Z. (2020). A Systematic Literature Review on Multi-Criteria Decision Making in Disaster Management. *International Journal of Business Ecosystem and Strategy* (2687-2293), 2(2), 1–7. <https://doi.org/10.36096/ijbes.v2i2.197>
- Maskrey, A., Jain, G., & Lavell, A. (2023). The social construction of systemic risk: towards an actionable framework for risk governance. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 32(1), 4–26. <https://doi.org/10.1108/DPM-07-2022-0155>
- Mohanty, S. K., Chatterjee, R., & Shaw, R. (2020). Building Resilience of Critical Infrastructure: A Case of Impacts of Cyclones on the Power Sector in Odisha. *Climate*, 8(6), 73. <https://doi.org/10.3390/cli8060073>
- Moreno Flores, O. (2021). El paisaje como infraestructura para la resiliencia urbana frente a desastres : el caso de los Parques de Mitigación en la costa centro-sur de Chile post tsunami 2010 = Landscape as infrastructure for urban resilience to disasters : The case of Mitigation. *Cuadernos de Investigación Urbanística*, 139, 1. <https://doi.org/10.20868/ciur.2021.139.4778>
- Mukhtar, M. A., Shangguan, D., Ding, Y., Anjum, M. N., Banerjee, A., Butt, A. Q., Nilesh yadav, Li, D., Yang, Q., Khan, A. A., Muhammad, A., & He, B. B. (2024). Integrated flood risk assessment in Hunza-Nagar, Pakistan: unifying big climate data analytics and multi-criteria decision-making with GIS. *Frontiers in Environmental Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1337081>
- Nyimbili, P. H., & Erden, T. (2020). A Hybrid Approach Integrating Entropy-AHP and GIS for Suitability Assessment of Urban Emergency Facilities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(7), 419. <https://doi.org/10.3390/ijgi9070419>
- Okem, E. S., Nwokediegwu, Z. Q. S., Umoh, A. A., Biu, P. W., Obaedo, B. O., & Sibanda, M. (2024). Civil Engineering and Disaster Resilience: A Review of Innovations in Building Safe and Sustainable Communities. *International Journal of Science and Research Archive*, 11(1), 639–650. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.11.1.0107>
- Osman, S. A., & Das, J. (2023). GIS-based flood risk assessment using multi-criteria decision analysis of Shebelle River Basin in southern Somalia. *SN Applied Sciences*, 5(5), 134. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05360-5>

- Paredes Gaibor, D. S., Montero Jiménez, J. F., & Palacios Vélez, J. L. (2024). Análisis de la vulnerabilidad de infraestructuras críticas como represas, puentes y carreteras ante eventos asociados al fenómeno de El Niño – Oscilación Sur en la Costa ecuatoriana. *AlfaPublicaciones*, 6(1.1), 45–61. <https://doi.org/10.33262/ap.v6i1.1.454>
- Pescaroli, G., Guida, K., Reynolds, J., Pulwarty, R. S., Linkov, I., & Alexander, D. E. (2023). Managing systemic risk in emergency management, organizational resilience and climate change adaptation. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 32(1), 234–251. <https://doi.org/10.1108/DPM-08-2022-0179>
- Prihartanto, E., Rohman, M. A., & Wiguna, I. P. A. (2023). Assessment of airport conditions in resilience efforts: A review. *E3S Web of Conferences*, 429, 03001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342903001>
- Quiroz-Del Pezo, S., & Olives-Maldonado, J. (2023). GIRD y la vulnerabilidad socioeconómica en la comuna Las Balsas de la parroquia Colonche, 2022. *593 Digital Publisher CEIT*, 8(4), 76–93. <https://doi.org/10.33386/593dp.2023.4.1895>
- Rajarethinam, K., & Devadas, V. (2021). Water Resilience Mapping of Chennai, India Using Analytical Hierarchy Process. *Ecological Processes*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00341-1>
- Rezaei, H., Macioszek, E., Derakhshesh, P., Houshyar, H., Ghabouli, E., Bakhshi Lomer, A. R., Ghanbari, R., & Esmailzadeh, A. (2023). A Spatial Decision Support System for Modeling Urban Resilience to Natural Hazards. *Sustainability*, 15(11), 8777. <https://doi.org/10.3390/su15118777>
- Rivière, M., Lenglet, J., Noirault, A., Pimont, F., & Dupuy, J. (2023). Mapping territorial vulnerability to wildfires: A participative multi-criteria analysis. *Forest Ecology and Management*, 539, 121014. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121014>
- Rodríguez Rodríguez, I., Campo Valera, M., & Calderón Fajardo, V. (2023). *Conectando el Futuro: Ciudades Inteligentes, IoT y la Transformación de la Sociedad Urbana*. UMA Editorial. <https://doi.org/10.24310/mumaedmumaed.27>
- Santoro, F. M., Silva, M. M. d., Fernandes, A., & Toscano, B. (2022). A Domain Ontology on Cascading Effects in Critical Infrastructures Based on a Systematic Literature Review. *International Journal of Critical Infrastructures*, 18(1), 1. <https://doi.org/10.1504/ijcis.2022.10044304>
- Schnittfinke, T., Greiving, S., Nyamai, D. N., Scholz, W., Schramm, S., Behrens, R., Zuidgeest, M., Rink, B., Momm, S., Travassos, L., Brauer, B., & Fischer, L. (2024). Criticality assessment and cascading effects: impacts of COVID-19 disruptions in public transport on marginalized groups in Dortmund, Germany, São Paulo, Brazil, and Cape Town, South Africa. *Journal of Surveillance, Security and Safety*, 5(3), 140–159. <https://doi.org/10.20517/jsss.2024.11>
- Schweikert, A. E., & Deinert, M. R. (2021). Vulnerability and resilience of power systems infrastructure to natural hazards and climate change. *WIREs Climate Change*, 12(5). <https://doi.org/10.1002/wcc.724>
- Shamsi, N., & Helmrich, A. (2025). Interdependency classification: a framework for infrastructure resilience. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 5(1), 015009. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/adac89>
- Simpson, N. P., Mach, K. J., Constable, A., Hess, J., Hogarth, R., Howden, M., Lawrence, J., Lempert, R. J., Muccione, V., Mackey, B., New, M. G., O'Neill, B., Otto, F., Pörtner, H., Reisinger, A., Roberts, D., Schmidt, D. N., Seneviratne, S., Strongin, S., ... Trisos, C. H. (2021). A framework for complex climate change risk assessment. *One Earth*, 4(4), 489–501. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.03.005>

- Stanković, A. M., Tomsovic, K. L., De Caro, F., Braun, M., Chow, J. H., Čukalevski, N., Dobson, I., Eto, J., Fink, B., Hachmann, C., Hill, D., Ji, C., Kavicky, J. A., Levi, V., Liu, C., Mili, L., Moreno, R., Panteli, M., Petit, F. D., ... Zhao, S. (2023). Methods for Analysis and Quantification of Power System Resilience. *IEEE Transactions on Power Systems*, 38(5), 4774–4787. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3212688>
- Tempa, K. (2022). District flood vulnerability assessment using analytic hierarchy process (AHP) with historical flood events in Bhutan. *PLOS ONE*, 17(6), e0270467. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270467>
- Verschuur, J., Fernández-Pérez, A., Mühlhofer, E., Nirandjan, S., Borgomeo, E., Becher, O., Voskaki, A., Oughton, E. J., Stankovski, A., Greco, S. F., Koks, E. E., Pant, R., & Hall, J. W. (2024). Quantifying climate risks to infrastructure systems: A comparative review of developments across infrastructure sectors. *PLOS Climate*, 3(4), e0000331. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000331>
- Verschuur, J., Pant, R., Koks, E., & Hall, J. (2022). A systemic risk framework to improve the resilience of port and supply-chain networks to natural hazards. *Maritime Economics & Logistics*, 24(3), 489–506. <https://doi.org/10.1057/s41278-021-00204-8>
- Villagrán, C.-P., & Soto, M.-V. (2024). Vías de Evacuación e Infraestructura Crítica para la Gestión del Riesgo de Tsunamis en la ciudad de La Serena, Chile. *Revista de Estudios Latinoamericanos Sobre Reducción Del Riesgo de Desastres REDER*, 8(1), 151. <https://doi.org/10.55467/reder.v8i1.144>