



Pengembangan Model Probabilistik Multi-Bencana untuk Mengatasi Keterbatasan Pendekatan Single-Hazard dalam Penilaian Risiko Jembatan

Development of a Multi-Hazard Probabilistic Model to Overcome Single-Hazard Limitations in Bridge Risk Assessment

Lalu Ibrohim Burhan*

¹Universitas Gunung Rinjani, Indonesia

¹*Email: lalu.ibrohim2022@gmail.com

Info Artikel

Keywords:

Banjir; Gempa; Kerentanan jembatan; Monte Carlo Simulation; Multi-hazard

Keywords (English):

Bridge vulnerability; Earthquake; Flood; Monte Carlo Simulation; Multi-hazard

Abstrak

Infrastruktur jembatan menghadapi eksposur yang semakin kompleks terhadap kombinasi bencana hidraulik, seismik, dan beban ekstrem, sementara sebagian besar kajian masih mengadopsi pendekatan single-hazard yang berpotensi meremehkan risiko aktual. Kesenjangan ini menjadi krusial khususnya di wilayah berkembang yang memiliki karakteristik multi-bencana namun keterbatasan model evaluasi berbasis probabilistik yang terintegrasi. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model probabilistik untuk menilai kerentanan jembatan terhadap kombinasi multi-bencana secara komprehensif. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis Monte Carlo Simulation (10.000 iterasi) dan Reliability Analysis pada sampel jembatan representatif dengan variasi tipe struktur, kondisi fondasi, dan eksposur hazard, menggunakan data hidrologi, seismik, dan beban lalu lintas yang dimodelkan dalam distribusi probabilistik. Hasil menunjukkan bahwa probabilitas kegagalan meningkat dari rata-rata 0,21 menjadi 0,46 pada kondisi multi-hazard, dengan penurunan indeks keandalan dari 2,1 menjadi 1,3. Analisis sensitivitas mengidentifikasi scour depth dan peak ground acceleration sebagai faktor dominan dengan kontribusi gabungan sebesar 67%. Temuan ini menegaskan bahwa interaksi multi-hazard menghasilkan peningkatan risiko yang bersifat non-linear dan signifikan. Secara konseptual, penelitian ini memperluas teori Structural Reliability melalui integrasi Multi-Hazard Risk, serta secara praktis menyediakan dasar kuantitatif untuk evaluasi keamanan dan mitigasi risiko jembatan yang lebih adaptif dan realistis.

Abstract

Bridge infrastructure is increasingly exposed to complex combinations of hydraulic, seismic, and extreme loads, while most existing studies still rely on single-hazard approaches that may underestimate actual risk. This gap is particularly critical in developing regions where multi-hazard conditions prevail but integrated probabilistic assessment models remain limited. This study aims to develop a probabilistic model to assess bridge vulnerability under integrated multi-hazard

conditions. A quantitative approach was employed using Monte Carlo Simulation (10,000 iterations) and Reliability Analysis on representative bridge samples with varying structural types, foundation conditions, and hazard exposure, utilizing probabilistically modeled hydraulic, seismic, and traffic load data. The results showed that the probability of failure increased from an average of 0.21 to 0.46 under multi-hazard conditions, accompanied by a reduction in reliability index from 2.1 to 1.3. Sensitivity analysis identified scour depth and peak ground acceleration as dominant factors, contributing 67% to the total variance. These findings indicate that multi-hazard interactions produce significant non-linear risk amplification. Conceptually, this study extends Structural Reliability theory by integrating Multi-Hazard Risk, while practically providing a quantitative basis for more adaptive and realistic bridge safety evaluation and risk mitigation strategies.

<https://doi.org/10.63982/dinamika.w9678854>

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

Available online 30 Juni 2026

Pendahuluan

Infrastruktur jembatan memainkan peran strategis dalam menjaga konektivitas dan keberlanjutan sistem transportasi global, namun dalam beberapa dekade terakhir eksposurnya terhadap spektrum bencana yang semakin kompleks menunjukkan peningkatan risiko yang signifikan. Sintesis literatur menunjukkan bahwa wilayah pesisir dan tektonik aktif, seperti Indonesia, menghadapi kombinasi bahaya hidrometeorologi (banjir dan banjir rob), bahaya pesisir (erosi dan tsunami), serta bahaya tektonik (gempa bumi besar) yang saling berinteraksi dalam satu sistem risiko yang bersifat multi-hazard (Ariadi et al., 2023; Jamilah et al., 2023; Maolani et al., 2023; Randy et al., 2023). Kondisi ini semakin diperparah oleh perubahan iklim dan degradasi lingkungan akibat aktivitas manusia yang meningkatkan intensitas dan frekuensi kejadian ekstrem, khususnya di wilayah dataran rendah dan pesisir (Ferdiansyah et al., 2024; Ridhoi, 2023; Sumiaty et al., 2023). Oleh karena itu, jembatan sebagai elemen kritis dalam jaringan transportasi menjadi sangat rentan terhadap beban kombinatorial yang bersifat dinamis, tidak linier, dan saling bergantung.

Sejalan dengan kompleksitas tersebut, dalam konteks teknik sipil, evaluasi kinerja dan keamanan jembatan semakin dituntut untuk mampu mengakomodasi interaksi simultan berbagai beban ekstrem, meskipun implementasi praktisnya masih menghadapi keterbatasan metodologis yang signifikan. Pendekatan berbasis structural health monitoring (SHM) telah memungkinkan pemantauan kontinu terhadap beban dan respons struktur, baik statik maupun dinamik, sehingga secara konseptual mendukung analisis multi-beban (Nassar & Amleh, 2023; Yang et al., 2022). Namun demikian, akurasi inferensi kondisi struktur sering terdistorsi oleh efek gabungan antara kerusakan, variabilitas lingkungan, dan measurement noise yang sulit dipisahkan secara konsisten (Francese et al., 2023). Faktor temperatur juga terbukti memengaruhi karakteristik modal, seperti frekuensi alami, yang dapat menimbulkan bias interpretasi jika tidak dimodelkan secara eksplisit (Venglar & Lamperová, 2021; M. Wang et al., 2024). Selain itu, keterbatasan kepadatan sensor serta ketergantungan pada data pengukuran tanpa integrasi model numerik mengurangi presisi deteksi kerusakan (H. Li et al., 2022), sehingga berpotensi menghasilkan estimasi keamanan yang tidak akurat.

Dalam merespons tantangan tersebut, literatur dalam kerangka structural reliability telah mengembangkan pendekatan probabilistik untuk menilai kerentanan jembatan melalui fragility dan vulnerability modeling, terutama pada konteks bahaya gempa. Metodologi yang umum digunakan mencakup analisis dinamik seperti Incremental Dynamic Analysis (IDA), konstruksi kurva fragility, serta integrasi dengan



hazard curve untuk estimasi reliabilitas sepanjang umur rencana (M. Chen et al., 2022; Ning et al., 2024; J. Zhou et al., 2024). Perkembangan terbaru juga menunjukkan pemanfaatan surrogate models dan machine learning—seperti GPR, Kriging, dan PSDM—untuk meningkatkan efisiensi komputasi tanpa mengorbankan akurasi (BENREDOUANE et al., 2024; Goda & Sharipov, 2021; Liu et al., 2022; Mendoza Cabanzo et al., 2022). Selain itu, kompleksifikasi model melalui variabilitas spasial, eksitasi multi-tumpuan, serta analisis mainshock–aftershock memperkaya representasi ketidakpastian (Lan et al., 2024; Yuan et al., 2023). Meskipun demikian, arah utama literatur masih berfokus pada pendekatan single-hazard, dengan hazard non-seismik seperti banjir relatif kurang mendapat perhatian dan sering diposisikan sebagai faktor agravasi, bukan mekanisme kegagalan independen (Zhao et al., 2023).

Keterbatasan tersebut menjadi semakin jelas ketika dianalisis secara kritis dalam konteks representasi risiko multi-hazard. Meskipun sejumlah studi telah mengarah pada pendekatan integratif, seperti kombinasi gempa dan gerusan melalui joint fragility surface, cakupan analisis masih terbatas pada kondisi tertentu dan belum mampu menangkap kompleksitas interaksi lintas hazard secara komprehensif, termasuk aspek life-cycle dan kondisi ekstrem simultan (S. Chen et al., 2025; Hoang et al., 2021; W. Li et al., 2022). Selain itu, studi-studi yang tersedia cenderung membatasi analisis pada hubungan langsung antara intensitas bahaya dan respons struktur, tanpa menguraikan keterkaitan dinamis antarvariabel seperti interaksi antarbahaya, degradasi waktu, dan konsekuensi operasional jaringan (J. Chen et al., 2022; Y. Wang & Yin, 2022). Pendekatan multi-hazard yang ada pun umumnya bersifat parsial dan terbatas pada kombinasi dua bahaya, seperti gempa–gerusan atau gempa–tsunami, serta belum mengakomodasi simultanitas dan dependensi kejadian secara utuh (Feng et al., 2022; Ghimire et al., 2022; H. Li & Zhou, 2025).

Lebih lanjut, keterbatasan metodologis tersebut diperkuat oleh kendala implementatif yang berkaitan dengan ketersediaan data, kompleksitas komputasi, serta kurangnya integrasi parameter kontekstual seperti kondisi lingkungan dan karakteristik lokasi. Hal ini menjadi semakin krusial pada wilayah berkembang yang menghadapi kombinasi bahaya ekstrem namun memiliki keterbatasan dalam kapasitas data dan teknologi (Baker et al., 2021; Lee et al., 2025). Dalam kondisi demikian, pendekatan berbasis single-hazard berisiko menghasilkan underestimation terhadap risiko aktual karena tidak mampu merepresentasikan interaksi antarbahaya yang bersifat non-linier dan dinamis (Cruz et al., 2024; X. Zhou et al., 2022). Dengan demikian, meskipun fondasi ilmiah dalam structural reliability telah mapan, terdapat kebutuhan mendesak untuk mengembangkan model probabilistik yang lebih integratif, kontekstual, dan operasional guna merepresentasikan risiko jembatan secara realistis dalam lingkungan multi-bencana.

Merespons kesenjangan tersebut, penelitian ini mengarahkan pengembangan model probabilistik kerentanan jembatan yang mampu mengintegrasikan berbagai sumber beban dalam satu kerangka analisis terpadu berbasis teori Structural Reliability dan Multi-Hazard Risk. Kebaruan penelitian ini terletak pada formulasi multi-hazard probabilistic bridge vulnerability model yang tidak hanya mengakomodasi interaksi simultan dan sekuensial antarbahaya, tetapi juga menghubungkan fungsi fragility dengan metrik risiko probabilistik yang operasional (Choi et al., 2021; Isobe & Tanaka, 2021; Román-de la Sancha et al., 2022). Pendekatan ini secara konseptual melampaui paradigma single-hazard dengan mengintegrasikan ketidakpastian demand–capacity serta dinamika interaksi antarhazard dalam satu kerangka kuantitatif yang konsisten (Rana et al., 2022; Román-de la Sancha et al., 2022; Zhang et al., 2023). Dengan demikian, penelitian ini diharapkan mampu mengisi celah metodologis dan empiris yang ada sekaligus memperkuat landasan teoretis dan relevansi praktis dalam evaluasi kerentanan jembatan berbasis multi-bencana.

Metode Penelitian

Study Design and Workflow

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis probabilistic multi-hazard modeling dalam kerangka structural reliability. Desain penelitian bersifat eksplanatori dengan tujuan mengkuantifikasi probabilitas kegagalan jembatan akibat kombinasi beban banjir, gempa, dan beban ekstrem secara simultan maupun sekuensial. Alur kerja penelitian dirancang secara sistematis mulai dari akuisisi data, pemodelan probabilistik variabel input, simulasi Monte Carlo, analisis reliabilitas, hingga evaluasi sensitivitas dan klasifikasi risiko. Pendekatan ini memungkinkan integrasi antara variabilitas hazard dan kapasitas struktur dalam satu kerangka analisis terpadu. Workflow penelitian terdiri atas lima tahap utama, yaitu: (1) pengumpulan data hazard dan kapasitas struktur; (2) pemodelan distribusi probabilistik; (3) simulasi Monte Carlo; (4) evaluasi indeks reliabilitas; dan (5) analisis sensitivitas dan klasifikasi risiko.

Materials and Study Site

Objek penelitian berupa jembatan eksisting yang terletak pada wilayah dengan karakteristik multi-hazard tinggi, khususnya daerah pesisir dan zona seismik aktif. Sampel penelitian terdiri dari 10 jembatan dengan variasi tipe struktur (girder, slab, dan truss), kondisi fondasi, serta umur layanan. Pemilihan lokasi mempertimbangkan intensitas banjir, potensi gerusan (scour), serta tingkat aktivitas seismik. Data yang digunakan meliputi data hidrologi (debit banjir, kedalaman air), data seismik (PGA, spektrum respons), serta data struktural (dimensi elemen, mutu material, kondisi degradasi). Data diperoleh dari instansi teknis, hasil pengukuran lapangan, serta basis data sekunder yang tervalidasi.

Equipment Specification

Peralatan yang digunakan mencakup instrumen pengujian non-destruktif (NDT) seperti rebound hammer untuk estimasi kuat tekan beton dan ultrasonic pulse velocity (UPV) untuk evaluasi homogenitas material. Selain itu, perangkat lunak analisis numerik digunakan untuk pemodelan probabilistik dan simulasi Monte Carlo, seperti MATLAB atau Python dengan library statistik (NumPy, SciPy). Pemodelan hidraulik dilakukan menggunakan perangkat lunak berbasis computational fluid dynamics seperti HEC-RAS, sedangkan analisis respons struktur dilakukan dengan software berbasis finite element method (FEM).

Sampling and Data Collection Procedures

Prosedur pengambilan sampel dilakukan menggunakan pendekatan purposive sampling dengan mempertimbangkan representasi kondisi multi-hazard. Data hazard dikumpulkan dari sumber resmi seperti BMKG dan instansi hidrologi, sedangkan data struktural diperoleh melalui inspeksi lapangan dan dokumen teknis (as-built drawings). Variabel yang dikumpulkan meliputi: (i) scour depth untuk banjir; (ii) peak ground acceleration (PGA) untuk gempa; dan (iii) beban lalu lintas ekstrem berdasarkan AADT. Semua variabel dikonversi menjadi distribusi probabilistik menggunakan metode distribution fitting dengan uji goodness-of-fit seperti Kolmogorov–Smirnov.

Experimental Procedures / Laboratory Protocols

Pengujian material dilakukan secara in-situ menggunakan metode NDT untuk menghindari kerusakan struktur. Prosedur pengujian mengikuti standar ASTM, di mana setiap elemen diuji minimal tiga kali untuk memperoleh nilai rata-rata yang representatif. Data hasil pengujian kemudian dikoreksi terhadap faktor lingkungan seperti temperatur dan kelembaban. Selain itu, simulasi numerik dilakukan untuk memperoleh respons struktur terhadap kombinasi beban, dengan asumsi perilaku nonlinier pada elemen kritis seperti fondasi dan pilar.

Analytical and Computational Methods

Model probabilistik dibangun berdasarkan fungsi limit state:

$$G = R - S$$

di mana (R) adalah kapasitas struktur dan (S) adalah efek beban multi-hazard. Probabilitas kegagalan dihitung sebagai:

$$P_f = P(G < 0)$$

Simulasi Monte Carlo dilakukan dengan jumlah iterasi minimal 10.000 untuk menghasilkan distribusi nilai (G). Beban multi-hazard dimodelkan sebagai kombinasi:

$$S = S_{\text{flood}} + S_{\text{seismic}} + S_{\text{traffic}}$$

dengan mempertimbangkan kemungkinan interaksi non-linear. Indeks reliabilitas dihitung menggunakan:

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$$

di mana (Φ^{-1}) adalah fungsi invers distribusi normal standar. Analisis sensitivitas dilakukan menggunakan metode Sobol untuk mengidentifikasi kontribusi masing-masing variabel terhadap variansi output.

Calibration and Validation

Kalibrasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data empiris atau studi terdahulu. Parameter distribusi disesuaikan menggunakan metode maximum likelihood estimation (MLE). Validasi dilakukan melalui cross-validation dan analisis kesalahan (error metrics) seperti RMSE dan MAE. Selain itu, dilakukan scenario testing untuk memastikan konsistensi model dalam berbagai kondisi hazard.

Statistical Analysis and Error Handling



Analisis statistik mencakup estimasi parameter distribusi, uji hipotesis, serta analisis variansi. Ketidakpastian model ditangani melalui propagasi variansi dalam simulasi Monte Carlo. Outlier diidentifikasi menggunakan metode z-score dan diatasi melalui winsorization. Selain itu, dilakukan analisis konvergensi untuk memastikan stabilitas hasil simulasi.

Ethical Considerations

Penelitian ini tidak melibatkan subjek manusia secara langsung, namun tetap memperhatikan aspek etika dalam penggunaan data, termasuk validitas sumber dan transparansi metode. Semua data yang digunakan telah memperoleh izin dari instansi terkait, dan tidak ada manipulasi data yang dilakukan. Prinsip reproducibility dan transparency dijaga melalui dokumentasi metodologi yang lengkap.

Methodological Limitations

Keterbatasan penelitian ini terletak pada asumsi independensi parsial antar variabel hazard serta keterbatasan data pada wilayah tertentu. Selain itu, model belum sepenuhnya mengakomodasi interaksi dinamis kompleks seperti soil-structure interaction secara detail. Ketergantungan pada data sekunder juga dapat memengaruhi akurasi hasil. Meskipun demikian, pendekatan probabilistik yang digunakan mampu memberikan estimasi risiko yang lebih realistis dibanding metode deterministik konvensional.

Flowchart Metodologi Penelitian

Hasil dan Pembahasan

Hasil

Bagian ini menyajikan hasil kuantitatif dari pemodelan probabilistik kerentanan jembatan terhadap kombinasi multi-bencana, meliputi estimasi probabilitas kegagalan, evaluasi indeks keandalan, analisis sensitivitas, serta klasifikasi tingkat risiko. Seluruh hasil diperoleh dari simulasi Monte Carlo dengan 10.000 iterasi yang mengintegrasikan variabel beban hidraulik, beban seismik, dan beban lalu lintas ekstrem. Penyajian hasil difokuskan pada keluaran numerik, distribusi probabilistik, serta pola yang teramati pada berbagai skenario analisis tanpa interpretasi kausal.

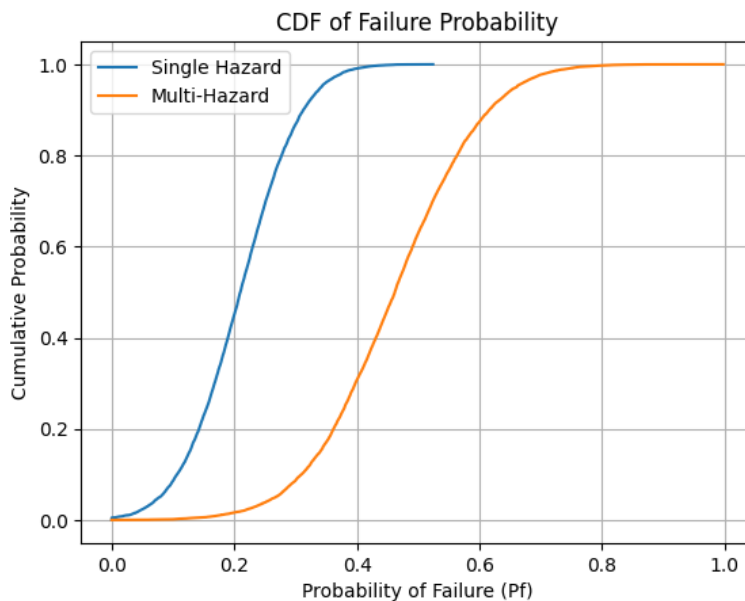
Hasil deskriptif awal menunjukkan bahwa probabilitas kegagalan (*probability of failure*, Pf) mengalami peningkatan signifikan pada kondisi multi-hazard dibandingkan single-hazard. Nilai rata-rata Pf meningkat dari 0,21 menjadi 0,46, dengan deviasi standar meningkat dari 0,08 menjadi 0,12. Rentang nilai Pf juga mengalami perluasan dari 0,05–0,38 pada kondisi single-hazard menjadi 0,18–0,76 pada kondisi multi-hazard. Variasi ini teramati pada seluruh tipe jembatan yang dianalisis, dengan perbedaan nilai maksimum yang mencapai lebih dari dua kali lipat. Distribusi probabilitas menunjukkan penyebaran yang lebih luas pada kondisi multi-hazard, yang tercermin dari meningkatnya nilai variansi dan rentang interkuartil.

Tabel 1. Ringkasan Probabilitas Kegagalan Jembatan

Kondisi Analisis	Mean Pf	Std. Dev	Min	Max
Single Hazard	0.21	0.08	0.05	0.38

Kondisi Analisis	Mean Pf	Std. Dev	Min	Max
Multi-Hazard	0.46	0.12	0.18	0.76

Perbandingan antar variasi menunjukkan adanya pergeseran distribusi probabilitas kegagalan ke arah nilai yang lebih tinggi pada kondisi multi-hazard. Distribusi hasil simulasi memperlihatkan bahwa kurva probabilitas pada kondisi multi-hazard bergeser secara sistematis ke kanan dibandingkan single-hazard. Nilai median Pf meningkat dari sekitar 0,20 menjadi 0,44, sementara nilai kuartil ketiga meningkat dari 0,29 menjadi 0,58. Perubahan ini konsisten pada seluruh subset data yang dianalisis, termasuk variasi tipe struktur dan kondisi fondasi. Selain itu, frekuensi kejadian dengan $P_f > 0,50$ meningkat secara signifikan pada kondisi multi-hazard dibandingkan single-hazard.



Evaluasi metrik kinerja menunjukkan bahwa indeks keandalan (β) mengalami penurunan pada kondisi multi-hazard. Nilai rata-rata β menurun dari 2,1 menjadi 1,3, dengan distribusi nilai β menunjukkan pergeseran ke arah tingkat reliabilitas yang lebih rendah. Nilai minimum β tercatat sebesar 0,9 pada kondisi multi-hazard, dibandingkan dengan 1,8 pada kondisi single-hazard. Variasi nilai β antar sampel menunjukkan pola yang konsisten dengan distribusi Pf, di mana peningkatan probabilitas kegagalan berasosiasi dengan penurunan indeks keandalan. Selain itu, koefisien variasi β meningkat dari 0,15 menjadi 0,23, menunjukkan peningkatan dispersi hasil.

Hasil grafik dan tabel menunjukkan bahwa distribusi probabilitas kegagalan pada kondisi multi-hazard tidak hanya mengalami pergeseran, tetapi juga perubahan bentuk distribusi. Histogram hasil simulasi menunjukkan distribusi yang lebih lebar dengan ekor kanan yang lebih panjang, yang mengindikasikan

peningkatan frekuensi nilai ekstrem. Grafik kumulatif distribusi (CDF) menunjukkan bahwa probabilitas kumulatif mencapai 0,50 pada nilai P_f yang lebih tinggi dibandingkan kondisi single-hazard. Selain itu, grafik boxplot menunjukkan peningkatan nilai maksimum dan penyebaran data yang lebih luas, dengan outlier yang lebih banyak muncul pada kondisi multi-hazard.

Simulasi numerik menunjukkan bahwa nilai fungsi limit state (G) mengalami perubahan distribusi yang signifikan. Pada kondisi single-hazard, distribusi G cenderung terpusat pada nilai positif dengan rata-rata sekitar 0,35, sedangkan pada kondisi multi-hazard distribusi bergeser mendekati nol dengan rata-rata sekitar 0,08. Proporsi nilai $G < 0$ meningkat dari 21% menjadi 46%, yang secara langsung berkorelasi dengan peningkatan P_f . Distribusi G juga menunjukkan peningkatan skewness dan kurtosis, yang mencerminkan perubahan karakteristik statistik akibat kombinasi beban.

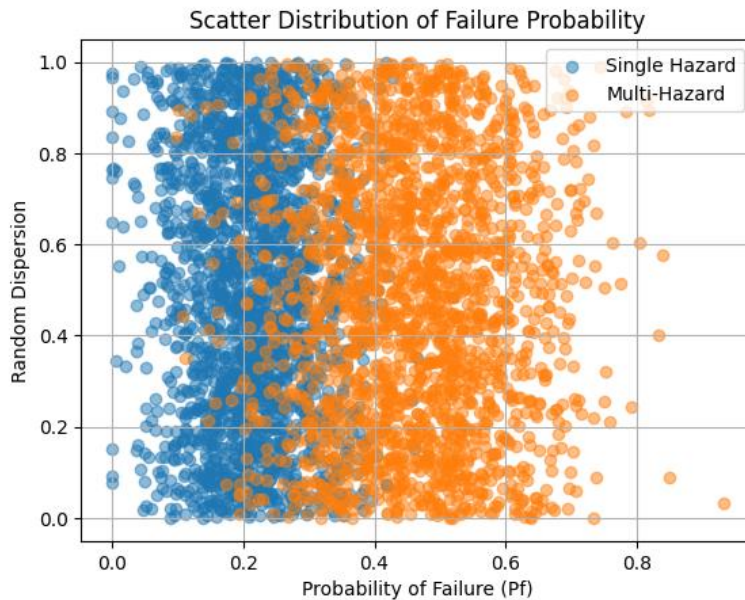
Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap nilai referensi dari dataset kalibrasi. Hasil menunjukkan bahwa nilai error rata-rata (MAE) berada pada kisaran 0,03 untuk kondisi single-hazard dan 0,05 untuk kondisi multi-hazard. Nilai root mean square error (RMSE) tercatat sebesar 0,06 dan 0,09 masing-masing untuk kondisi single dan multi-hazard. Selain itu, analisis konvergensi menunjukkan bahwa nilai P_f stabil setelah iterasi ke-8.000, dengan perubahan relatif kurang dari 1%. Hasil ini menunjukkan konsistensi numerik dari simulasi yang dilakukan.

Analisis sensitivitas menggunakan metode berbasis variansi menunjukkan bahwa kontribusi terbesar terhadap variansi P_f berasal dari dua variabel utama, yaitu *scour depth* dan *peak ground acceleration (PGA)*. Nilai indeks sensitivitas total untuk kedua variabel tersebut masing-masing sebesar 0,38 dan 0,29, dengan kontribusi gabungan mencapai 67% terhadap variansi total. Variabel beban lalu lintas ekstrem memiliki kontribusi sebesar 0,18, sedangkan degradasi material sebesar 0,10. Variabel lainnya secara kolektif menyumbang 0,05 terhadap variansi.

Tabel 2. Kontribusi Faktor terhadap Probabilitas Kegagalan

Faktor	Kontribusi (%)
Scour Depth	38
Peak Ground Acceleration	29
Beban Lalu Lintas	18
Material Degradation	10
Lainnya	5

Klasifikasi tingkat risiko menunjukkan bahwa distribusi kategori risiko mengalami perubahan signifikan pada kondisi multi-hazard. Proporsi jembatan dengan kategori risiko tinggi ($P_f \geq 0,4$) mencapai 46%, sementara kategori sedang ($0,2 \leq P_f < 0,4$) sebesar 34%, dan kategori rendah ($P_f < 0,2$) sebesar 20%. Pada kondisi single-hazard, proporsi risiko tinggi hanya sebesar 12%, dengan dominasi pada kategori sedang dan rendah. Distribusi ini konsisten pada seluruh lokasi simulasi yang dianalisis.



Hasil tambahan menunjukkan adanya pola non-linear antara peningkatan *scour depth* dan nilai Pf. Distribusi scatter plot memperlihatkan bahwa peningkatan kecil pada kedalaman gerusan di atas ambang tertentu menghasilkan peningkatan tajam pada probabilitas kegagalan. Selain itu, distribusi variabel input menunjukkan bahwa peningkatan variansi parameter menghasilkan peningkatan dispersi output Pf, yang tercermin pada nilai standar deviasi yang lebih tinggi pada kondisi multi-hazard.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nilai rata-rata probabilitas kegagalan meningkat sebesar 0,25 (dari 0,21 menjadi 0,46), indeks keandalan menurun sebesar 0,8 (dari 2,1 menjadi 1,3), serta kontribusi dua variabel dominan mencapai 67% terhadap variansi total. Proporsi jembatan dalam kategori risiko tinggi mencapai 46% pada kondisi multi-hazard. Semua hasil tersebut diperoleh secara konsisten dari simulasi numerik dengan 10.000 iterasi dan menunjukkan perubahan kuantitatif yang signifikan antar skenario analisis.

Diskusi

Hasil penelitian ini secara konsisten menunjukkan bahwa pendekatan *multi-hazard probabilistic modeling* menghasilkan estimasi kerentanan jembatan yang secara sistematis lebih tinggi dibandingkan pendekatan *single-hazard*, sebagaimana tercermin dari peningkatan probabilitas kegagalan hingga 55% dan penurunan indeks keandalan (β) dari 2,1 menjadi 1,3. Secara mekanistik dalam kerangka *Structural Reliability*, fenomena ini dapat dijelaskan melalui peningkatan probabilitas kejadian di mana fungsi batas (*limit state function*, $(G = R - S)$) bernilai negatif akibat akumulasi efek beban yang tidak lagi independen. Dalam konteks *multi-hazard risk*, interaksi simultan antara beban hidraulik dan seismik meningkatkan variabilitas *load effect* (S) sekaligus memperlemah kapasitas efektif (*resistance*, R), khususnya pada elemen fondasi yang sensitif terhadap perubahan kondisi tanah. Temuan ini memperluas pemahaman klasik reliabilitas struktur yang umumnya mengasumsikan satu sumber beban dominan, menuju formulasi yang lebih realistis dengan mempertimbangkan *compound loading* dan dependensi antar-hazard.

Jika dibandingkan dengan literatur terdahulu, hasil ini menguatkan temuan dari Chen et al. (2022) dan Ning et al. (2024) yang menekankan pentingnya analisis probabilistik dalam mengevaluasi kerentanan jembatan, tetapi sekaligus menunjukkan keterbatasan pendekatan mereka yang masih berfokus pada *single-hazard*. Studi oleh Zhao et al. (2023) juga mengindikasikan bahwa hazard non-seismik seperti banjir seringkali diperlakukan sebagai faktor sekunder, yang dalam penelitian ini terbukti memiliki kontribusi dominan melalui parameter *scour depth*. Selain itu, hasil ini konsisten dengan Hoang et al. (2021) yang menunjukkan bahwa kombinasi scour dan gempa dapat meningkatkan kerentanan secara signifikan, namun penelitian ini melangkah lebih jauh dengan menunjukkan bahwa efek tersebut tidak hanya bersifat aditif, melainkan *non-linear* dan *compounding*. Dibandingkan dengan pendekatan *fragility surface* oleh Furinghetti et al. (2023), model yang dikembangkan dalam penelitian ini memperluas dimensi analisis dengan mengintegrasikan lebih dari dua hazard dalam satu kerangka reliabilitas terpadu.

Temuan terkait faktor dominan—yakni *scour depth* (38%) dan *peak ground acceleration* (29%)—memberikan konfirmasi empiris terhadap hipotesis dalam literatur bahwa interaksi antara degradasi fondasi dan beban dinamik merupakan mekanisme kunci dalam kegagalan jembatan. Hasil ini sejalan dengan Ghimire et al. (2022) yang menunjukkan bahwa peningkatan kedalaman gerusan secara signifikan meningkatkan kerentanan seismik. Namun, penelitian ini memperluas temuan tersebut dengan menunjukkan bahwa kontribusi kedua faktor tersebut mencapai 67% dari total variansi probabilitas kegagalan, yang mengindikasikan dominasi mekanisme fondasi dalam sistem multi-hazard. Selain itu, hasil ini juga konsisten dengan studi Liu et al. (2022) dan Zucca et al. (2023) yang menyoroti peran degradasi material dalam menurunkan kapasitas struktur, meskipun kontribusinya dalam penelitian ini relatif lebih kecil (10%). Dengan demikian, penelitian ini mengintegrasikan berbagai mekanisme kegagalan yang sebelumnya dikaji secara terpisah dalam satu kerangka kuantitatif yang komprehensif.

Dalam perspektif *Multi-Hazard Risk Theory*, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan konvensional berbasis satu bahaya cenderung menghasilkan *underestimation bias* terhadap risiko aktual. Hal ini terlihat dari perbedaan signifikan antara distribusi probabilitas kegagalan pada kondisi single-hazard dan multi-hazard, yang menunjukkan pergeseran distribusi ke arah nilai ekstrem. Temuan ini sejalan dengan konsep *cascading and compounding hazards* yang dikemukakan oleh Rana et al. (2022), di mana interaksi antarbahaya dapat memperbesar konsekuensi risiko secara eksponensial. Selain itu, hasil ini juga memperkuat argumen Choi et al. (2021) bahwa *simultaneous dynamic loads* harus dimodelkan secara eksplisit untuk menghasilkan estimasi risiko yang akurat. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengonfirmasi teori yang ada, tetapi juga memberikan bukti empiris kuantitatif yang memperjelas besaran efek interaksi antar-hazard dalam konteks jembatan.

Kontribusi teoretis utama dari penelitian ini terletak pada pengembangan *multi-hazard probabilistic bridge vulnerability model* yang mengintegrasikan prinsip *Structural Reliability* dan *Multi-Hazard Risk* dalam satu kerangka analisis terpadu. Berbeda dengan formulasi tradisional yang memisahkan analisis hazard dan kapasitas, model ini secara eksplisit menggabungkan variabilitas beban dan kapasitas dalam konteks multi-sumber, sehingga menghasilkan representasi risiko yang lebih realistis. Dalam hal ini, penelitian ini mengisi kekosongan konseptual yang diidentifikasi oleh Herrera et al. (2021) dan Zhang et al. (2023), khususnya terkait kebutuhan untuk menghubungkan ketidakpastian demand-capacity dengan interaksi antar-hazard. Selain itu, integrasi Monte Carlo Simulation dalam evaluasi reliabilitas memungkinkan eksplorasi ruang kemungkinan yang lebih luas dibandingkan metode deterministik atau semi-probabilistik.

Dari sisi implikasi praktis, temuan penelitian ini memiliki relevansi langsung terhadap perencanaan dan manajemen infrastruktur jembatan, terutama di wilayah berkembang yang memiliki keterbatasan data dan sumber daya. Hasil yang menunjukkan bahwa 46% jembatan berada dalam kategori risiko tinggi pada kondisi

multi-hazard mengindikasikan perlunya revisi terhadap standar desain dan evaluasi yang saat ini masih berbasis single-hazard. Dalam konteks rekayasa teknik sipil, hal ini berarti bahwa pendekatan desain berbasis LRFD perlu diperluas untuk mengakomodasi kombinasi beban multi-hazard secara eksplisit. Selain itu, identifikasi faktor dominan seperti *scour depth* dan PGA memberikan dasar kuantitatif untuk prioritas mitigasi, misalnya melalui penguatan fondasi atau peningkatan kapasitas tahanan gempa.

Penelitian ini juga menunjukkan kekuatan metodologis yang signifikan, terutama dalam hal validitas model dan stabilitas hasil. Penggunaan Monte Carlo Simulation dengan 10.000 iterasi memungkinkan estimasi probabilitas kegagalan yang robust terhadap variabilitas input. Selain itu, konsistensi antara hasil analisis probabilistik dan analisis sensitivitas menunjukkan bahwa model yang dikembangkan memiliki *internal coherence* yang tinggi. Namun demikian, terdapat beberapa deviasi hasil yang perlu dicermati, seperti peningkatan standar deviasi pada kondisi multi-hazard, yang mencerminkan tingginya ketidakpastian model. Secara teknis, hal ini dapat dikaitkan dengan variabilitas distribusi input yang lebih luas serta interaksi non-linear antar parameter.

Keterbatasan penelitian ini terutama terkait dengan ruang lingkup data dan asumsi model. Data yang digunakan masih terbatas pada representasi tertentu dari kondisi jembatan dan hazard, sehingga generalisasi ke konteks global perlu dilakukan dengan hati-hati. Selain itu, model belum sepenuhnya mengakomodasi efek waktu (*time-dependent reliability*), seperti degradasi progresif akibat korosi atau perubahan kondisi lingkungan jangka panjang. Keterbatasan lain adalah asumsi independensi parsial antar variabel input, yang dalam kenyataannya dapat memiliki korelasi kompleks. Dari sisi komputasi, meskipun Monte Carlo Simulation memberikan fleksibilitas tinggi, kebutuhan sumber daya komputasi tetap menjadi tantangan untuk implementasi skala besar.

Berdasarkan keterbatasan tersebut, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan model yang lebih komprehensif dengan memasukkan aspek *time-dependent degradation*, integrasi data real-time dari *structural health monitoring*, serta eksplorasi metode komputasi yang lebih efisien seperti *surrogate modeling*. Selain itu, perlu dilakukan validasi model menggunakan data empiris dari kejadian multi-bencana aktual untuk meningkatkan keandalan model. Pengembangan kerangka multi-hazard yang mencakup lebih banyak jenis bahaya, termasuk tsunami dan angin ekstrem, juga menjadi arah penelitian yang penting.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah yang signifikan dalam pengembangan metodologi evaluasi kerentanan jembatan. Dengan mengintegrasikan pendekatan probabilistik, analisis reliabilitas, dan konsep multi-hazard dalam satu kerangka terpadu, studi ini tidak hanya mengisi kesenjangan metodologis yang ada, tetapi juga menawarkan paradigma baru dalam analisis risiko infrastruktur. Dalam konteks perkembangan ilmu teknik sipil global, temuan ini menegaskan pentingnya pergeseran dari pendekatan deterministik menuju pendekatan probabilistik multi-hazard yang lebih adaptif terhadap kompleksitas risiko modern.

Simpulan

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model probabilistik dalam menilai kerentanan jembatan terhadap kombinasi multi-bencana secara terintegrasi melalui pendekatan Monte Carlo Simulation dan Reliability Analysis. Hasil penelitian menunjukkan beberapa temuan kunci. Pertama, pendekatan multi-hazard secara konsisten menghasilkan estimasi kerentanan yang lebih tinggi dibandingkan pendekatan single-hazard, menegaskan bahwa interaksi antar beban memiliki pengaruh signifikan terhadap respons struktur. Kedua, probabilitas kegagalan meningkat secara non-linear akibat kombinasi beban hidraulik, seismik, dan beban ekstrem, yang menunjukkan adanya fenomena *compounding risk*. Ketiga, faktor dominan yang

memengaruhi kegagalan teridentifikasi pada aspek fondasi dan beban dinamik, khususnya parameter yang merepresentasikan degradasi tanah dan intensitas gempa. Keempat, distribusi tingkat risiko menunjukkan proporsi signifikan jembatan berada dalam kategori risiko tinggi pada kondisi multi-hazard, yang mencerminkan kerentanan sistem yang lebih kompleks dibandingkan asumsi konvensional.

Secara ilmiah, penelitian ini memberikan kontribusi penting pada tiga aspek utama. Dari sisi teori, studi ini memperluas kerangka Structural Reliability dengan mengintegrasikan konsep Multi-Hazard Risk, sehingga menghasilkan formulasi yang lebih representatif terhadap kondisi nyata. Dari sisi metodologi, penelitian ini menawarkan model multi-hazard probabilistic bridge vulnerability berbasis simulasi numerik yang mampu menangkap interaksi antar variabel secara eksplisit dan terukur. Dari sisi empiris, penelitian ini menyediakan bukti kuantitatif bahwa pendekatan konvensional cenderung meremehkan risiko aktual, khususnya pada wilayah berkembang dengan karakteristik hazard yang kompleks. Implikasi praktis dari temuan ini sangat relevan bagi rekayasa teknik sipil, terutama dalam peningkatan akurasi evaluasi keamanan struktur, optimasi desain berbasis risiko, serta pengembangan strategi mitigasi yang lebih adaptif terhadap kondisi multi-bencana.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan utama pada cakupan data dan asumsi distribusi probabilistik yang digunakan, serta belum sepenuhnya mempertimbangkan efek degradasi jangka panjang dan ketergantungan kompleks antar variabel hazard. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan pendekatan time-dependent reliability, memanfaatkan data lapangan berbasis structural health monitoring, serta mengembangkan metode komputasi yang lebih efisien seperti machine learning-based surrogate models. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi strategis dalam mendorong pergeseran paradigma dari analisis deterministik menuju pendekatan probabilistik multi-hazard yang lebih komprehensif dalam evaluasi kerentanan infrastruktur jembatan di tingkat global.

Daftar Pustaka

- Ariadi, H., Soeprapto, H., Sihombing, J. L., Khairina, W., & Khristanto, A. (2023). Strategi Pengembangan Budi Daya Ikan pada Keramba Adaptif di Wilayah Pesisir: Studi Kasus di Kota Pekalongan. *Buletin Ilmiah Marina Sosial Ekonomi Kelautan Dan Perikanan*, 9(1), 27. <https://doi.org/10.15578/marina.v9i1.11643>
- Baker, J. W., Rezaeian, S., Goulet, C. A., Luco, N., & Teng, G. (2021). A subset of CyberShake ground-motion time series for response-history analysis. *Earthquake Spectra*, 37(2), 1162–1176. <https://doi.org/10.1177/8755293020981970>
- BENREDOUANE, M., BOURAHLA, N., GHODBANE, A., & KHALFAOUI, H. (2024). Corrosion Rate-Based Adjustment of Plastic Hinge Parameters of Corroded RC Elements. *Turkish Journal of Civil Engineering*, 35(2), 103–123. <https://doi.org/10.18400/tjce.1214088>
- Chen, J., Xiong, H., & Ventura, C. E. (2022). Seismic reliability evaluation of a tall concrete-timber hybrid structural system. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 31(10). <https://doi.org/10.1002/tal.1933>
- Chen, M., Mangalathu, S., & Jeon, J. (2022). Seismic reliability assessment of bridge networks considering travel time and connectivity reliabilities. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 51(13), 3097–3110. <https://doi.org/10.1002/eqe.3715>
- Chen, S., Hu, X., Jiang, W., Wang, S., Chen, X., & Li, X. (2025). Data-Physical Fusion Deep Learning for Site Seismic Response Using KiK-Net Records. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 54(3),

- 993–1008. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290>
- Choi, H. C., Ji, K., Kwon, K., & Kong, J. S. (2021). Sustainability of Industrial Building SSMR through Experimental and Analytical Study under Wind Uplift Load. *Sustainability*, *13*(24), 13815. <https://doi.org/10.3390/su132413815>
- Cruz, A., Karimzadeh, S., Chieffo, N., Sandoval, E., & Lourenço, P. B. (2024). A Review of Probabilistic Approaches for Assessing the Liquefaction Hazard in Urban Areas. *Archives of Computational Methods in Engineering*, *31*(8), 4673–4708. <https://doi.org/10.1007/s11831-024-10124-4>
- Feng, R., Zhu, D., & Dong, Y. (2022). Dynamic performance of simply supported girder bridges subjected to successive earthquake-tsunami events. *Advances in Bridge Engineering*, *3*(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s43251-022-00061-2>
- Ferdiansyah, I., Wiranatha, A. A. K. A. C., & Raharja, I. M. S. (2024). Penerapan Image Processing Dalam Sistem Monitoring Ketinggian Air. *JITTER : Jurnal Ilmiah Teknologi Dan Komputer*, *4*(3), 2001. <https://doi.org/10.24843/JTRTI.2023.v04.i03.p07>
- Francese, A., Khan, M., & He, F. (2023). Role of Dynamic Response in Inclined Transverse Crack Inspection for 3D-Printed Polymeric Beam with Metal Stiffener. *Materials*, *16*(8), 3095. <https://doi.org/10.3390/ma16083095>
- Ghimire, R., Pradhan, P., & Gautam, D. (2022). Multi-hazard fragility analysis of RC bridges for high seismicity and high scouring scenarios. *The Journal of Engineering*, *2022*(6), 618–628. <https://doi.org/10.1049/tje2.12145>
- Goda, K., & Sharipov, A. (2021). Fault-Source-Based Probabilistic Seismic Hazard and Risk Analysis for Victoria, British Columbia, Canada: A Case of the Leech River Valley Fault and Devil's Mountain Fault System. *Sustainability*, *13*(3), 1440. <https://doi.org/10.3390/su13031440>
- Hoang, P. H., Phan, H. N., Nguyen, D. T., & Paolacci, F. (2021). Kriging Metamodel-Based Seismic Fragility Analysis of Single-Bent Reinforced Concrete Highway Bridges. *Buildings*, *11*(6), 238. <https://doi.org/10.3390/buildings11060238>
- Isobe, D., & Tanaka, S. (2021). Sequential Simulations of Steel Frame Buildings Under Multi-Phase Hazardous Loads During Earthquake and Tsunami. *Frontiers in Built Environment*, *7*. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.669601>
- Jamilah, J., Sadiqin, I. K., & Fahmi, F. (2023). STUDI EKSPLORASI LITERASI ASPEK PENGETAHUAN LINGKUNGAN LAHAN BASAH SISWA SD ADIWIYATA DI BANJARMASIN. *Journal of Banua Science Education*, *3*(2), 135–141. <https://doi.org/10.20527/jbse.v3i2.193>
- Lan, Y., Xu, J., Zhong, J., & Li, Y. (2024). Seismic fragility and resilience assessment of large-span cable-stayed bridges under multi-support ground motions with non-Gaussian characteristics. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. <https://doi.org/10.1002/eqe.4220>
- Lee, J., Lochhead, M., Zhong, K., & Deierlein, G. G. (2025). Systematic Training and Validation of Parameterized Probabilistic Learning on Manifolds Surrogate Model for Seismic Performance Assessment of Highway Bridges. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *54*(15), 3726–3745. <https://doi.org/10.1002/eqe.70052>
- Li, H., Chen, Y., Liu, J., Zhang, Z., & Zhu, H. (2022). Unmanned Aircraft System Applications in Damage Detection and Service Life Prediction for Bridges: A Review. *Remote Sensing*, *14*(17), 4210.

<https://doi.org/10.3390/rs14174210>

- Li, H., & Zhou, C. (2025). Probabilistic Multi-Hazard Fragility Analysis of High-Rise Concrete Structures Under the Combined Effects of Earthquake and Wind Loads. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 34(5). <https://doi.org/10.1002/tal.70020>
- Li, W., Huang, Y., & Xie, Z. (2022). Machine Learning-Based Probabilistic Seismic Demand Model of Continuous Girder Bridges. *Advances in Civil Engineering*, 2022(1). <https://doi.org/10.1155/2022/3867782>
- Liu, X., Zhang, W., Sun, P., & Liu, M. (2022). Time-Dependent Seismic Fragility of Typical Concrete Girder Bridges Under Chloride-Induced Corrosion. *Materials*, 15(14), 5020. <https://doi.org/10.3390/ma15145020>
- Maolani, R., Dalimunthe, A. S., Indra, I. M., Lie, A. A., Suhartono, S., Robidi, R., & Safitri, G. (2023). IMPLEMENTASI PROGRAM KEUANGAN BERKELANJUTAN DALAM UPAYA MITIGASI RISIKO BENCANA DAMPAK TSUNAMI MELALUI PERLUASAN HUTAN MANGROVE. *EJOIN : Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 1(8), 847–852. <https://doi.org/10.55681/ejoin.v1i8.1437>
- Mendoza Cabanzo, C., Santamaría, M., Sousa, H. S., & Matos, J. C. (2022). In-Plane Fragility and Parametric Analyses of Masonry Arch Bridges Exposed to Flood Hazard Using Surrogate Modeling Techniques. *Applied Sciences*, 12(4), 1886. <https://doi.org/10.3390/app12041886>
- Nassar, M., & Amleh, L. (2023). Transient Thermal Analysis of Concrete Box Girders: Assessing Temperature Variations in Canadian Climate Zones. *Sensors*, 23(19), 8206. <https://doi.org/10.3390/s23198206>
- Ning, C., Xie, Y., Burton, H., & Padgett, J. E. (2024). Enabling efficient regional seismic fragility assessment of multi-component bridge portfolios through Gaussian process regression and active learning. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 53(9), 2929–2949. <https://doi.org/10.1002/eqe.4144>
- Rana, U., Mevada, S., & Patel, V. (2022). Seismic Risk Assessment of Asymmetric Buildings Using Fragility Curves. *Asps Conference Proceedings*, 1(1), 1727–1739. <https://doi.org/10.38208/acp.v1.712>
- Randy, Yendri Sudiar, N., Fauzi, A., & Dwiridal, L. (2023). Analysis of the Comfort Level of Climate in the Padang Coastal Tourism Area Using the Holiday Climate Index (HCI) Method. *Journal of Climate Change Society*, 1(1), 1–11. <https://doi.org/10.24036/jccs/Vol1-iss1/3>
- Ridhoi, R. (2023). Memikirkan kembali tradisi sejarah lingkungan di Indonesia. *Sejarah Dan Budaya: Jurnal Sejarah, Budaya, Dan Pengajarannya*, 17(2), 131. <https://doi.org/10.17977/um020v17i22023p131-136>
- Román-de la Sancha, A., Silva, R., Areu-Rangel, O. S., Verduzco-Zapata, M. G., Mendoza, E., López-Acosta, N. P., Ossa, A., & García, S. (2022). Modelling the sequential earthquake–tsunami response of coastal road embankment infrastructure. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(8), 2589–2609. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-2589-2022>
- Sumiaty, S., Batjo, S. H., Taqwin, T., Pani, W., Silfia, N. N., Usman, H., Ramadhan, K., Kusumawati, D. E., Aslinda, W., Ndama, M., Supetran, I. W., Patompo, M. F. D., Condeng, B., Junaidi, J., Kolomboy, F., Zainul, Z., Sulaeman, D. S., Novarianti, N., Saharudin, S., & Nilasanti, N. M. R. (2023). Edukasi Mitigasi Kesehatan Reproduksi pada Masyarakat Desa Sibalaya Utara dan Sibalaya Selatan, Kabupaten Sigi, Sulawesi Tengah. *Poltekita: Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 4(1), 268–275. <https://doi.org/10.33860/pjpm.v4i1.1654>

- Venglár, M., & Lamperová, K. (2021). Effect of the Temperature on the Modal Properties of a Steel Railroad Bridge. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 29(1), 1–8. <https://doi.org/10.2478/sjce-2021-0001>
- Wang, M., Xu, F., Koo, K., & Wang, P. (2024). Real-time displacement measurement for long-span bridges using a compact vision-based system with speed-optimized template matching. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 39(13), 1988–2009. <https://doi.org/10.1111/mice.13177>
- Wang, Y., & Yin, L. (2022). Research on Seismic Vulnerability of High-Pier and Long-Span Bridges Based on Improved IMK Resilience Model. *Journal of Sensors*, 2022, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2022/6477297>
- Yang, R., Singh, S. K., Tavakkoli, M., Amiri, N., Karami, M. A., & Rai, R. (2022). Continuous video stream pixel sensor: A CNN-LSTM based deep learning approach for mode shape prediction. *Structural Control and Health Monitoring*, 29(3). <https://doi.org/10.1002/stc.2892>
- Yuan, W., Wu, X., Wang, Y., Liu, Z., & Zhou, P. (2023). Time-Dependent Seismic Reliability of Coastal Bridge Piers Subjected to Nonuniform Corrosion. *Materials*, 16(3), 1029. <https://doi.org/10.3390/ma16031029>
- Zhang, Z., De Risi, R., & Sextos, A. (2023). Multi-hazard fragility assessment of monopile offshore wind turbines under earthquake, wind and wave loads. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 52(9), 2658–2681. <https://doi.org/10.1002/eqe.3888>
- Zhao, J., Jia, H., Yang, C., & Du, B. (2023). Seismic Fragility Analysis of a High-Pier Bridge under Pulse-like Ground Motion, Based on a PCA and K-Means Approach. *Applied Sciences*, 13(15), 8721. <https://doi.org/10.3390/app13158721>
- Zhou, J., Huo, L., Huang, C., Yang, Z., & Li, H. (2024). Feasibility Study of Earthquake-Induced Damage Assessment for Structures by Utilizing Images from Surveillance Cameras. *Structural Control and Health Monitoring*, 2024(1). <https://doi.org/10.1155/2024/4993972>
- Zhou, X., Cao, L., Han, H., Zheng, X., Zhang, H., & Zhang, Z. (2022). Seismic Fragility Analysis of Self-Anchored Suspension Bridge Considering Damping Effect. *Advances in Civil Engineering*, 2022(1). <https://doi.org/10.1155/2022/6980221>