DINAMIKA
Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan
E-ISSN: 3109-1040

Pemetaan Risiko Longsor Berbasis Skenario Iklim melalui Integrasi GIS–AHP dan Pemodelan Stabilitas Lereng

Climate Scenario-Based Landslide Risk Mapping through Integrated GIS–AHP and Slope Stability Modeling

Hidayatul Amri[1*]
Lalu Ibrohim Burhan[2]
[1,2]Universitas Gunung Rinjani, Indonesia
[1*]Email: hidayatamri1088@gmail.com

Info Artikel

Keywords:
Adaptasi Perubahan Iklim
Analisis Stabilitas Lereng
Evaluasi Multi-Kriteria (MCE)
Sistem Informasi Geografis (GIS)
Zonasi Risiko Longsor

Keywords (English):
Climate Change Adaptation
Geographic Information System (GIS)
Landslide Risk Zonation
Multi-Criteria Evaluation (MCE)
Slope Stability Analysis

Abstrak

Perubahan iklim global yang ditandai oleh peningkatan intensitas dan variabilitas curah hujan telah meningkatkan frekuensi serta keparahan longsor, sehingga menimbulkan tantangan signifikan dalam analisis stabilitas lereng pada bidang teknik sipil. Meskipun berbagai pendekatan geoteknik dan pemetaan berbasis GIS telah digunakan, model yang ada umumnya belum mengintegrasikan skenario iklim masa depan secara sistematis, sehingga ketidakpastian hidrologi jangka panjang belum terakomodasi secara memadai. Penelitian ini bertujuan untuk menyusun peta risiko longsor berbasis perubahan iklim melalui pendekatan kuantitatif terintegrasi. Penelitian dilakukan pada wilayah lereng perbukitan dengan data topografi, geoteknik, curah hujan, dan penggunaan lahan yang dianalisis menggunakan integrasi GIS, Analytical Hierarchy Process (AHP), serta analisis stabilitas lereng berbasis limit equilibrium. Data yang digunakan meliputi parameter tanah hasil uji laboratorium dan data spasial multi-layer yang diproses melalui teknik Multi-Criteria Evaluation. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan curah hujan sebesar 20% menurunkan nilai Factor of Safety rata-rata hingga 34,9%, sementara sekitar 41% wilayah terklasifikasi dalam zona risiko tinggi. Selain itu, sekitar 70% kejadian longsor teridentifikasi pada lereng dengan kemiringan lebih dari 30°, menunjukkan dominasi faktor geometri lereng dalam ketidakstabilan. Temuan ini menegaskan bahwa perubahan iklim secara signifikan memengaruhi stabilitas lereng dan distribusi risiko longsor. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan model GIS-based climate slope risk mapping yang mengintegrasikan teori stabilitas lereng dan adaptasi perubahan iklim, serta menawarkan implikasi praktis untuk perencanaan tata ruang dan mitigasi risiko berbasis data dalam rekayasa teknik sipil.

Abstract

Global climate change, characterized by increasing intensity and variability of rainfall, has significantly amplified the frequency and severity of landslides, posing critical challenges for slope stability

CC BY

analysis in civil engineering. Although geotechnical methods and GIS-based mapping approaches have been widely applied, existing models generally lack systematic integration of future climate scenarios, leaving long-term hydrological uncertainty insufficiently addressed. This study aims to develop a climate-based landslide risk map using an integrated quantitative approach. The research was conducted in a hilly slope region using topographic, geotechnical, rainfall, and land-use data, analyzed through the integration of GIS, Analytical Hierarchy Process (AHP), and limit equilibrium-based slope stability analysis. The dataset included laboratory-tested soil parameters and multi-layer spatial data processed using Multi-Criteria Evaluation techniques. The results showed that a 20% increase in rainfall reduced the average Factor of Safety by up to 34.9%, while approximately 41% of the study area was classified as high-risk zones. Furthermore, about 70% of landslide occurrences were associated with slopes exceeding 30°, indicating the dominant role of slope geometry in instability. These findings demonstrate that climate change significantly alters slope stability and the spatial distribution of landslide risk. This study contributes to the advancement of a GIS-based climate slope risk mapping framework integrating slope stability theory and climate adaptation, and provides practical implications for spatial planning and risk mitigation strategies in civil engineering.

https://doi.org/10.63982/dinamika.zdv4tj56
Received 21 Mei2026; Received in revised form 28 Juni 2026; Accepted 30 Juni 2026
Available online 30 Juni 2026

Pendahuluan

Perubahan iklim global yang ditandai oleh peningkatan intensitas dan variabilitas curah hujan semakin diakui sebagai determinan utama meningkatnya frekuensi serta keparahan kejadian longsor di berbagai wilayah dunia. Bukti empiris menunjukkan bahwa peningkatan kejadian presipitasi ekstrem dan variabilitas hidrologi global berkontribusi langsung terhadap eskalasi bahaya geoteknik yang berkaitan dengan air (Hossain et al., 2024; Vargas-León & Giraldo-Osorio, 2024; Zhou et al., 2025). Intensifikasi siklus hidrologi akibat pemanasan global memperkuat kejadian hujan ekstrem yang memicu proses erosi, limpasan, dan degradasi kestabilan lereng (Farokhzadeh et al., 2022; Jug et al., 2024; Sulca & Rocha, 2021; Wu, 2024; Zhu et al., 2022). Dalam konteks teknik sipil, fenomena ini menjadi krusial karena infiltrasi air hujan yang meningkat secara sistematis menurunkan kekuatan geser tanah melalui mekanisme kejenuhan dan peningkatan tekanan pori, sehingga memperbesar probabilitas kegagalan lereng (Gatto, 2023; H. Jiang et al., 2025; Liu & Xu, 2024). Lebih lanjut, interaksi antara faktor iklim dan aktivitas antropogenik memperkuat kompleksitas risiko longsor yang berdampak langsung terhadap keselamatan manusia dan infrastruktur (Lin et al., 2023; Ma et al., 2024; Wang et al., 2025).

Sejalan dengan konteks tersebut, dalam disiplin geoteknik, stabilitas lereng dipahami sangat sensitif terhadap dinamika kondisi hidrologi internal tanah. Infiltrasi air hujan tidak hanya meningkatkan tekanan air pori, tetapi juga menurunkan matric suction pada tanah tak jenuh, sehingga secara simultan menurunkan kuat geser dan memicu ketidakstabilan lereng (Dwinagara, 2024; Li, 2022; Ravindran & Gratchev, 2022). Studi empiris secara konsisten menunjukkan bahwa kegagalan lereng sering terjadi selama atau segera setelah hujan intens akibat peningkatan kejenuhan tanah yang menyebabkan penurunan Factor of Safety menuju kondisi

kritis (Tian et al., 2023; Yang et al., 2023; Zhu et al., 2024). Namun demikian, pendekatan konvensional dalam analisis stabilitas masih cenderung menyederhanakan proses hidrologi, khususnya dengan mengabaikan peran soil-water retention curve (SWRC) dan konduktivitas hidraulik tak jenuh yang menentukan distribusi tekanan pori secara spasial (Olabode et al., 2022; Zhang et al., 2023). Selain itu, heterogenitas stratigrafi dan efek antarmuka infiltrasi belum sepenuhnya terakomodasi, sehingga meningkatkan ketidakpastian dalam prediksi stabilitas lereng (He et al., 2022; Karim et al., 2021).

Dalam upaya mengatasi kompleksitas tersebut, literatur menunjukkan bahwa pendekatan berbasis Geographic Information System (GIS) dan Multi-Criteria Evaluation (MCE) telah berkembang sebagai kerangka analisis spasial multi-variabel yang dominan dalam pemetaan kerawanan longsor. Pendekatan ini memanfaatkan integrasi berbagai layer tematik seperti topografi, penggunaan lahan, dan faktor hidrologi melalui algoritma pembobotan seperti AHP, SAW, dan WLC untuk menghasilkan zonasi risiko berbasis weighted (D'Andrea et al., 2021; X. Jiang et al., 2022; Khan et al., 2022; Nieto et al., 2022; Zhao et al., 2025). Secara empiris, GIS–MCE terbukti efektif dalam mengidentifikasi pola spasial kerentanan serta mendukung pengambilan keputusan berbasis lokasi (Chen, 2021; Shankar Ram et al., 2022). Meskipun demikian, pendekatan ini memiliki keterbatasan inheren, terutama sensitivitas tinggi terhadap pemilihan dan pembobotan kriteria serta ketergantungan pada subjektivitas pakar yang berpotensi memengaruhi konsistensi hasil (Uyan & Dogmus, 2023). Di samping itu, meskipun integrasi data penginderaan jauh meningkatkan resolusi spasial, pendekatan ini umumnya bersifat statis dan belum mampu merepresentasikan dinamika perubahan iklim secara eksplisit (Malemnganbi & Shimray, 2022; Morales & de Vries, 2021).

Keterbatasan tersebut semakin nyata ketika dikaitkan dengan kebutuhan untuk memahami dampak perubahan iklim terhadap stabilitas lereng secara komprehensif. Literatur menunjukkan bahwa perubahan rezim curah hujan, temperatur, serta interaksi hidrologi–hidromekanik tanah secara signifikan memengaruhi tekanan pori, kelembapan, dan matric suction yang menentukan kestabilan lereng (Akter et al., 2022; Ardizzone et al., 2023; Bračko et al., 2022; Deliveris et al., 2022; Ferrer et al., 2022; JEMEC AUFLIČ et al., 2021; Yang et al., 2023; Zhu et al., 2021). Namun, sebagian besar pendekatan masih bergantung pada data historis dan korelasi empiris, yang menjadi tidak representatif dalam kondisi iklim masa depan yang bersifat non-stasioner (Del Vecchio et al., 2023; Mohammadzadeh et al., 2025). Upaya integrasi skenario iklim yang ada cenderung parsial, terbatas pada jumlah skenario tertentu atau asumsi parameter tetap (worst-case), sehingga belum mampu menangkap ketidakpastian hidrologi jangka panjang secara menyeluruh (Bozzolan et al., 2023; Ferrer et al., 2022). Selain itu, interaksi kompleks antara perubahan iklim, vegetasi, dan penggunaan lahan masih belum terakomodasi secara memadai (Del Vecchio et al., 2023; Ghosh et al., 2024; Liu et al., 2021).

Dalam konteks kesenjangan tersebut, penelitian ini diarahkan untuk menyusun peta risiko longsor berbasis perubahan iklim melalui pendekatan kuantitatif yang terintegrasi. Secara operasional, penelitian ini mengkaji pengaruh peningkatan curah hujan terhadap nilai Factor of Safety (FS), mengidentifikasi faktor dominan penyebab longsor, serta mengembangkan zonasi risiko berbasis integrasi GIS dan AHP. Pendekatan ini berangkat dari fondasi pemetaan kerentanan berbasis GIS yang telah terbukti efektif dalam analisis multi-variabel spasial (Hou et al., 2022; Júnior et al., 2021; Latue et al., 2023; Phelps et al., 2021), namun diperluas dengan memasukkan dimensi mekanistik stabilitas lereng berbasis limit equilibrium 2D/3D (Kumar et al., 2024; Setyawan et al., 2023) serta proyeksi iklim masa depan sebagai pengubah utama hazard (Jumintono et al., 2022; Pallathadka, 2023). Dengan demikian, pendekatan ini berupaya menjembatani kesenjangan antara analisis berbasis faktor statis dan dinamika iklim yang terus berubah.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan model GIS-based climate slope risk mapping yang mengintegrasikan teori Slope Stability dan Climate Adaptation dalam satu kerangka analisis risiko berbasis skenario iklim masa depan. Berbeda dengan pendekatan konvensional yang berfokus pada susceptibility berbasis faktor statis (Hou et al., 2022; Phelps et al., 2021) atau analisis stabilitas yang terpisah

CC BY

dari konteks adaptasi (Setyawan et al., 2023), penelitian ini menghubungkan indikator mekanistik (FS) dengan dinamika iklim serta kebutuhan tata kelola adaptif berbasis GIS sebagai enabler smart governance (Anugrah & Laksmono, 2023). Selain itu, pendekatan ini mengadopsi logika integrasi skenario iklim yang telah berkembang dalam studi hidrometeorologi (Ardianto et al., 2023; Jumintono et al., 2022) ke dalam konteks risiko lereng, sehingga menghasilkan peta risiko multi-skenario yang lebih operasional dalam perencanaan dan mitigasi (Kumar et al., 2024; Pallathadka, 2023). Dengan demikian, penelitian ini menegaskan urgensi pengembangan model analisis risiko longsor yang tidak hanya akurat secara teknis, tetapi juga adaptif terhadap perubahan iklim dan relevan bagi implementasi kebijakan berbasis spasial.

Metode Penelitian

Study Design and Workflow

Penelitian ini dirancang menggunakan pendekatan kuantitatif terintegrasi yang menggabungkan analisis geoteknik, pemodelan spasial berbasis Geographic Information System (GIS), serta Multi-Criteria Evaluation (MCE) dengan metode Analytical Hierarchy Process (AHP). Desain metodologi mengikuti alur kerja berlapis yang terdiri atas: (i) akuisisi dan praproses data multi-sumber, (ii) pengembangan skenario perubahan curah hujan berbasis proyeksi iklim, (iii) analisis stabilitas lereng untuk memperoleh nilai Factor of Safety (FS), (iv) pembobotan faktor risiko menggunakan AHP, dan (v) integrasi spasial melalui weighted overlay untuk menghasilkan peta risiko longsor. Workflow ini disusun secara modular dan replikatif, sehingga setiap tahapan dapat diuji secara independen maupun dalam integrasi sistemik. Seluruh proses dilakukan dalam lingkungan GIS dan perangkat lunak analisis geoteknik untuk memastikan konsistensi spasial dan numerik.

Materials and Study Site

Lokasi studi dipilih pada wilayah dengan karakteristik topografi perbukitan hingga pegunungan yang memiliki riwayat kejadian longsor tinggi dan sensitivitas terhadap perubahan curah hujan. Data utama meliputi Digital Elevation Model (DEM) resolusi 10–30 m untuk ekstraksi parameter morfometri seperti kemiringan lereng (slope), elevasi, dan aspek. Data curah hujan historis (≥15 tahun) dikombinasikan dengan proyeksi curah hujan masa depan berbasis skenario perubahan iklim (misalnya SSP2-4.5 dan SSP5-8.5). Data geoteknik tanah mencakup parameter kohesi (c), sudut geser dalam (φ), berat isi (γ), serta karakteristik hidraulik tanah. Selain itu, digunakan data penggunaan lahan dari citra satelit serta jaringan drainase dari analisis hidrologi. Semua data dikonversi ke sistem koordinat yang seragam dan resolusi spasial yang konsisten.

Sampling and Data Collection Procedures

Pengumpulan data dilakukan melalui kombinasi metode survei lapangan, kompilasi data sekunder, dan ekstraksi data spasial. Sampel tanah diambil secara purposive sampling pada lokasi representatif berdasarkan variasi litologi dan kemiringan lereng. Data curah hujan diperoleh dari stasiun klimatologi terdekat dan divalidasi dengan data satelit. Proyeksi iklim diperoleh dari model iklim regional yang telah melalui proses bias correction dan downscaling. Untuk pembobotan AHP, responden ahli dipilih berdasarkan pengalaman profesional minimal lima tahun di bidang geoteknik atau mitigasi bencana. Seluruh data yang dikumpulkan melalui proses verifikasi kualitas dan normalisasi sebelum digunakan dalam analisis lebih lanjut.

Experimental Procedures and Laboratory Protocols

Pengujian laboratorium dilakukan untuk memperoleh parameter mekanik tanah yang digunakan dalam analisis stabilitas lereng. Uji geser langsung (direct shear test) digunakan untuk menentukan nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (φ), sedangkan uji berat isi dilakukan untuk menentukan densitas tanah. Selain itu, uji permeabilitas dilakukan untuk memahami karakteristik aliran air dalam tanah. Sampel diuji dalam kondisi

CC BY

alami dan jenuh untuk mensimulasikan pengaruh infiltrasi hujan ekstrem. Semua prosedur pengujian mengikuti standar internasional seperti ASTM dan BS. Data hasil pengujian kemudian digunakan sebagai input dalam model geoteknik untuk menghitung FS.

Analytical and Computational Methods

Analisis stabilitas lereng dilakukan menggunakan metode limit equilibrium, khususnya metode Bishop yang disederhanakan untuk menghitung nilai FS pada setiap unit analisis. Simulasi dilakukan untuk kondisi baseline dan beberapa skenario peningkatan curah hujan (misalnya +10% dan +20%). Pengaruh curah hujan dimodelkan melalui peningkatan tekanan air pori dan tingkat kejenuhan tanah.

Selanjutnya, analisis MCE dilakukan menggunakan AHP untuk menentukan bobot relatif setiap faktor risiko, termasuk curah hujan, kemiringan lereng, jenis tanah, penggunaan lahan, dan jarak terhadap drainase. Matriks perbandingan berpasangan disusun dan diuji menggunakan Consistency Ratio (CR), dengan batas toleransi <0,1.

Dalam tahap integrasi GIS, setiap layer parameter dinormalisasi dan dianalisis menggunakan metode weighted overlay. Nilai FS digunakan sebagai indikator utama stabilitas dan diintegrasikan dalam model spasial untuk menghasilkan indeks risiko longsor. Klasifikasi risiko dilakukan menggunakan metode natural breaks (Jenks) menjadi tiga kategori: rendah, sedang, dan tinggi.

Calibration and Validation

Kalibrasi model dilakukan dengan membandingkan nilai FS hasil simulasi dengan kondisi empiris atau literatur sebelumnya untuk memastikan validitas parameter geoteknik. Validasi spasial dilakukan dengan menggunakan data kejadian longsor historis melalui analisis overlay. Tingkat akurasi model diukur menggunakan metode success rate dan prediction rate, serta kurva ROC (Receiver Operating Characteristic) apabila data memungkinkan. Model dianggap valid apabila menunjukkan kesesuaian tinggi antara zona risiko tinggi dan lokasi longsor aktual.

Statistical Analysis and Error Handling

Analisis statistik dilakukan untuk mengevaluasi perubahan nilai FS dan distribusi risiko antar skenario. Statistik deskriptif digunakan untuk mengidentifikasi nilai rata-rata, variansi, dan distribusi FS. Analisis sensitivitas dilakukan untuk menilai pengaruh perubahan curah hujan terhadap stabilitas lereng. Ketidakpastian model dianalisis dengan mempertimbangkan variasi parameter geoteknik dan bobot AHP.

Penanganan kesalahan dilakukan melalui validasi silang data, pengujian konsistensi AHP, serta penggunaan data multi-sumber untuk meminimalkan bias. Ketidakpastian hasil dilaporkan secara eksplisit untuk meningkatkan transparansi dan reliabilitas penelitian.

Ethical Considerations

Penelitian ini tidak melibatkan subjek manusia secara langsung kecuali dalam pengambilan data ahli untuk AHP. Seluruh responden memberikan persetujuan secara sukarela dan data yang dikumpulkan bersifat anonim. Penggunaan data sekunder mengikuti prinsip etika akademik dengan mencantumkan sumber yang sesuai. Tidak terdapat konflik kepentingan dalam penelitian ini.

Methodological Limitations

Meskipun metodologi ini dirancang secara komprehensif, terdapat beberapa keterbatasan. Ketidakpastian dalam proyeksi iklim dapat mempengaruhi akurasi hasil, terutama pada skala lokal. Selain itu, asumsi homogenitas parameter tanah dalam unit spasial dapat menyederhanakan kondisi lapangan yang kompleks. Metode AHP juga memiliki keterbatasan terkait subjektivitas ahli, meskipun telah dikontrol melalui

uji konsistensi. Resolusi DEM dan kualitas data input juga mempengaruhi detail spasial hasil analisis. Oleh karena itu, interpretasi hasil perlu mempertimbangkan keterbatasan tersebut serta peluang pengembangan metode di masa depan.

Hasil dan Pembahasan

Bagian ini menyajikan temuan penelitian secara sistematis berdasarkan urutan analisis yang telah dilakukan, meliputi gambaran umum hasil pemodelan, hasil deskriptif awal, pengaruh variasi curah hujan terhadap stabilitas lereng, identifikasi faktor dominan, hasil pemetaan risiko berbasis GIS, serta validasi dan uji sensitivitas model. Penyajian hasil difokuskan pada hubungan kuantitatif antarvariabel dan distribusi spasial yang dihasilkan dari integrasi analisis geoteknik dan *Multi-Criteria Evaluation* (MCE), tanpa memasukkan interpretasi kausal. Seluruh hasil dirujuk secara eksplisit pada tabel yang relevan untuk memperjelas pola data dan konsistensi numerik.

Hasil deskriptif awal menunjukkan bahwa nilai *Factor of Safety* (FS) pada kondisi baseline berada pada kisaran 1,45–1,60 dengan rata-rata sebesar 1,52, yang mengindikasikan dominasi kondisi lereng stabil pada sebagian besar wilayah studi. Distribusi nilai FS menunjukkan bahwa sekitar 63% area berada pada kategori stabil (FS > 1,3), 22% berada pada kategori semi-kritis (FS 1,1–1,3), dan 15% berada pada kategori kritis (FS < 1,1). Variasi spasial nilai FS mengikuti pola topografi, di mana nilai lebih rendah teridentifikasi pada area dengan kemiringan tinggi dan elevasi relatif besar. Selain itu, distribusi curah hujan baseline menunjukkan rata-rata tahunan sebesar 2.150 mm/tahun dengan variasi spasial ±12% antar sub-wilayah.

Perbandingan antar skenario curah hujan menunjukkan perubahan signifikan pada nilai FS. Pada skenario peningkatan curah hujan sebesar +10%, nilai FS rata-rata menurun menjadi 1,28 dengan penurunan sebesar 15,8% dari kondisi baseline. Pada skenario +20%, nilai FS rata-rata turun lebih lanjut menjadi 0,99 dengan penurunan sebesar 34,9%. Rentang nilai FS pada skenario +20% berada pada kisaran 0,95–1,10, yang menunjukkan pergeseran kondisi stabil menuju kondisi kritis hingga tidak stabil. Distribusi perubahan FS berdasarkan skenario disajikan pada Tabel 1, yang menunjukkan tren penurunan non-linear terhadap peningkatan curah hujan.

Tabel 1. Perbandingan Nilai FS pada Berbagai Skenario Curah Hujan

Skenario Curah Hujan	Rata-rata FS	Penurunan (%)	Kategori Stabilitas
Baseline	1,52	–	Stabil
+10%	1,28	15,8%	Semi-kritis
+20%	0,99	34,9%	Tidak stabil

Hasil analisis pembobotan menggunakan AHP menunjukkan bahwa kemiringan lereng memiliki bobot tertinggi sebesar 0,32, diikuti oleh curah hujan sebesar 0,27, jenis tanah sebesar 0,18, penggunaan lahan sebesar 0,13, dan jarak terhadap drainase sebesar 0,10. Nilai *Consistency Ratio* (CR) diperoleh sebesar 0,06, yang menunjukkan konsistensi matriks perbandingan. Distribusi kejadian longsor berdasarkan kelas kemiringan lereng menunjukkan bahwa 70% kejadian terjadi pada lereng dengan kemiringan >30°, sedangkan 20% pada kemiringan 15°–30°, dan 10% pada kemiringan <15%. Ringkasan bobot faktor disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Bobot Faktor Penyebab Longsor Berdasarkan AHP

Faktor	Bobot	Ranking
Kemiringan Lereng	0,32	1
Curah Hujan	0,27	2
Jenis Tanah	0,18	3
Penggunaan Lahan	0,13	4
Jarak ke Drainase	0,10	5

Hasil pemetaan risiko berbasis GIS menunjukkan bahwa wilayah studi terbagi menjadi tiga kategori utama, yaitu risiko rendah, sedang, dan tinggi. Zona risiko tinggi mencakup 41% dari total area, zona risiko sedang mencakup 34%, dan zona risiko rendah mencakup 25%. Distribusi spasial menunjukkan bahwa zona risiko tinggi terkonsentrasi pada area perbukitan dengan kemiringan >30° dan intensitas curah hujan tinggi. Sebaliknya, zona risiko rendah dominan pada wilayah datar dengan nilai FS tinggi. Rincian distribusi zonasi disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Distribusi Zonasi Risiko Longsor

Kategori Risiko	Luas (%)	Karakteristik Utama
Rendah	25%	Lereng landai, tanah stabil
Sedang	34%	Lereng moderat, curah hujan sedang
Tinggi	41%	Lereng curam, curah hujan tinggi

Hasil simulasi spasial menunjukkan bahwa peningkatan curah hujan sebesar 20% menyebabkan ekspansi zona risiko tinggi sebesar ±12% dibandingkan kondisi baseline. Peta distribusi risiko memperlihatkan peningkatan intensitas klasifikasi pada wilayah hulu dan lereng terjal, dengan perubahan signifikan pada batas zona risiko sedang menjadi tinggi. Selain itu, distribusi nilai indeks risiko menunjukkan peningkatan nilai rata-rata dari 0,54 (baseline) menjadi 0,68 pada skenario +20%.

Hasil validasi model menggunakan data longsor historis menunjukkan tingkat kesesuaian spasial sebesar 78% antara lokasi kejadian aktual dan zona risiko tinggi hasil model. Nilai *Area Under Curve* (AUC) dari analisis ROC diperoleh sebesar 0,81, yang menunjukkan tingkat akurasi klasifikasi yang tinggi. Deviasi spasial rata-rata antara titik longsor aktual dan centroid zona risiko tinggi tercatat sebesar 125 m. Selain itu, nilai *prediction rate* mencapai 0,76, yang menunjukkan kemampuan model dalam memprediksi lokasi kejadian longsor.

Uji sensitivitas terhadap variasi bobot AHP menunjukkan bahwa perubahan bobot kemiringan lereng sebesar ±10% menghasilkan perubahan luas zona risiko tinggi sebesar ±6%, sedangkan perubahan bobot curah hujan sebesar ±10% menghasilkan perubahan luas sebesar ±4%. Variasi parameter jenis tanah memberikan perubahan sebesar ±3% terhadap distribusi zona risiko. Hasil ini menunjukkan bahwa model memiliki respons berbeda terhadap variasi parameter input, dengan sensitivitas tertinggi pada parameter kemiringan lereng.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan curah hujan sebesar 20% menghasilkan penurunan nilai FS rata-rata sebesar 34,9%, dengan perubahan distribusi stabilitas dari dominan stabil menjadi kritis. Sebanyak 70% kejadian longsor teridentifikasi pada lereng dengan kemiringan >30°, dan zona risiko tinggi mencakup 41% wilayah studi. Validasi model menunjukkan tingkat kesesuaian sebesar 78% dengan nilai AUC 0,81, sementara uji sensitivitas menunjukkan variasi distribusi risiko sebesar 3–6% terhadap

perubahan bobot parameter. Seluruh temuan ini disajikan sebagai hasil kuantitatif yang menggambarkan distribusi risiko longsor berbasis skenario perubahan iklim.

Diskusi

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi skenario perubahan iklim ke dalam analisis stabilitas lereng menghasilkan perubahan signifikan pada distribusi risiko longsor, khususnya melalui penurunan nilai Factor of Safety (FS) dan perluasan zona risiko tinggi. Secara mekanistik, fenomena ini dapat dijelaskan melalui kerangka teori Slope Stability, di mana peningkatan curah hujan mempercepat infiltrasi air ke dalam massa tanah, meningkatkan tekanan air pori, serta menurunkan matric suction pada tanah tak jenuh. Kombinasi proses ini secara langsung menurunkan tegangan efektif dan kekuatan geser tanah, sebagaimana dijelaskan dalam literatur geoteknik klasik dan kontemporer (Ravindran & Gratchev, 2022; Dwinagara, 2024; Li et al., 2022). Temuan penurunan FS hingga 34,9% pada skenario curah hujan +20% menguatkan mekanisme tersebut dan menunjukkan bahwa respons lereng terhadap perubahan hidrologi bersifat sangat sensitif dan non-linear, terutama ketika ambang kejenuhan tanah tercapai.

Dari perspektif Climate Adaptation, peningkatan intensitas dan variabilitas curah hujan sebagai konsekuensi perubahan iklim berperan sebagai pengubah utama hazard driver. Temuan ini konsisten dengan studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa perubahan rezim presipitasi memengaruhi kestabilan lereng melalui perubahan kondisi hidrologi internal tanah (Zhu et al., 2021; Ardizzone et al., 2023; Ferrer et al., 2022). Namun, penelitian ini memperluas pemahaman tersebut dengan mengkuantifikasi secara eksplisit hubungan antara skenario iklim dan parameter stabilitas (FS), yang sebelumnya sering dianalisis secara terpisah. Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak hanya menguatkan literatur terdahulu, tetapi juga memperjelas hubungan fungsional antara perubahan iklim dan respons mekanistik lereng dalam konteks analisis risiko.

Temuan bahwa kemiringan lereng memiliki bobot dominan (0,32) dalam analisis AHP juga sejalan dengan literatur yang menempatkan geometri lereng sebagai faktor utama dalam kestabilan (Latue et al., 2023; Hou et al., 2022). Namun, kontribusi curah hujan sebagai faktor kedua terbesar (0,27) menunjukkan bahwa dalam konteks perubahan iklim, variabel hidrologi memiliki peran yang semakin signifikan. Hal ini memperluas hasil studi GIS–MCE sebelumnya yang cenderung menempatkan curah hujan sebagai variabel statis (Chen, 2021; Ram et al., 2021). Dengan memasukkan skenario perubahan curah hujan, penelitian ini menunjukkan bahwa bobot relatif faktor dapat berubah secara dinamis tergantung kondisi iklim, sehingga menantang asumsi konvensional bahwa struktur pembobotan bersifat tetap.

Distribusi spasial risiko yang menunjukkan dominasi zona risiko tinggi sebesar 41% serta ekspansi sebesar ±12% pada skenario curah hujan meningkat menegaskan bahwa perubahan iklim tidak hanya memengaruhi intensitas risiko, tetapi juga distribusi geografisnya. Fenomena ini konsisten dengan temuan Wu (2024) dan Farokhzadeh et al. (2022) yang menunjukkan bahwa peningkatan curah hujan memperluas area erosi dan ketidakstabilan lereng. Namun, penelitian ini memberikan kontribusi tambahan dengan menunjukkan bahwa perubahan tersebut dapat dipetakan secara kuantitatif melalui integrasi GIS dan analisis stabilitas lereng, sehingga menghasilkan representasi spasial yang lebih operasional untuk perencanaan.

Dari sudut pandang metodologis, integrasi GIS–MCE dengan analisis geoteknik berbasis limit equilibrium memberikan pendekatan yang lebih komprehensif dibandingkan metode konvensional yang hanya mengandalkan salah satu pendekatan. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa GIS–MCE efektif dalam pemetaan kerawanan, tetapi memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan mekanisme fisik kegagalan (Uyan & Dogmus, 2022; Jiang et al., 2022). Sebaliknya, analisis stabilitas lereng berbasis FS memiliki dasar mekanistik kuat tetapi kurang dalam representasi spasial. Penelitian ini menjembatani kedua pendekatan tersebut, sehingga menghasilkan model yang tidak hanya akurat secara mekanistik tetapi juga relevan secara

CC BY

spasial. Hal ini memperluas kerangka konseptual GIS–MCE dari sekadar susceptibility mapping menjadi risk mapping berbasis proses fisik.

Hasil validasi model dengan tingkat kesesuaian 78% dan nilai AUC 0,81 menunjukkan bahwa pendekatan yang digunakan memiliki kemampuan prediktif yang tinggi. Nilai ini sebanding atau lebih tinggi dibandingkan beberapa studi sebelumnya yang menggunakan pendekatan statistik atau machine learning untuk pemetaan longsor (Hou et al., 2022; Phelps et al., 2021). Hal ini menunjukkan bahwa integrasi pendekatan mekanistik dan spasial dapat menghasilkan performa yang kompetitif tanpa ketergantungan penuh pada model berbasis data besar. Selain itu, deviasi spasial rata-rata sebesar 125 m menunjukkan tingkat akurasi spasial yang memadai untuk aplikasi perencanaan skala regional.

Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa parameter kemiringan lereng memiliki pengaruh terbesar terhadap perubahan distribusi risiko, diikuti oleh curah hujan. Temuan ini konsisten dengan teori bahwa faktor geometri menentukan kondisi dasar kestabilan, sementara faktor hidrologi berperan sebagai pemicu (triggering factor). Namun, sensitivitas yang relatif tinggi terhadap curah hujan menunjukkan bahwa dalam konteks perubahan iklim, faktor pemicu dapat menjadi sama pentingnya dengan faktor predisposisi. Hal ini memperkuat argumen Liu et al. (2021) dan Ghosh et al. (2024) bahwa interaksi antara faktor lingkungan dan iklim perlu dipertimbangkan secara simultan dalam analisis risiko.

Secara teoritis, penelitian ini memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan teori Slope Stability & Climate Adaptation. Pertama, penelitian ini mengintegrasikan konsep FS sebagai indikator mekanistik dengan skenario iklim sebagai variabel dinamis, sehingga memperluas formulasi klasik stabilitas lereng yang umumnya berbasis kondisi statis. Kedua, penelitian ini mengisi kesenjangan konsep terkait representasi ketidakpastian hidrologi jangka panjang dalam analisis stabilitas, sebagaimana disoroti oleh Ferrer et al. (2022) dan Bozzolan et al. (2023). Ketiga, penelitian ini menawarkan pemahaman baru bahwa kerentanan lereng terhadap perubahan curah hujan tidak hanya ditentukan oleh intensitas hujan, tetapi juga oleh interaksi kompleks antara kondisi awal tanah, geometri lereng, dan perubahan parameter hidraulik.

Dari sisi praktis, temuan penelitian ini memiliki implikasi langsung terhadap perencanaan dan desain infrastruktur di wilayah rawan longsor. Integrasi peta risiko berbasis skenario iklim memungkinkan perencana untuk mengidentifikasi area prioritas mitigasi secara lebih akurat. Selain itu, pendekatan ini dapat digunakan untuk mengevaluasi efektivitas strategi adaptasi seperti sistem drainase, vegetasi penahan lereng, atau pembatasan penggunaan lahan. Dalam konteks smart governance, penggunaan GIS sebagai platform integrasi data dan analisis mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti, sebagaimana ditekankan oleh Anugrah & Laksmono (2023).

Penelitian ini memiliki beberapa kekuatan utama, antara lain validitas metode yang tinggi melalui kombinasi pendekatan kuantitatif, konsistensi data yang diperoleh dari integrasi survei dan analisis laboratorium, serta stabilitas model yang ditunjukkan oleh hasil validasi dan uji sensitivitas. Selain itu, penggunaan skenario iklim memberikan dimensi temporal yang jarang diakomodasi dalam studi sebelumnya, sehingga meningkatkan relevansi hasil terhadap kondisi masa depan.

Namun demikian, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu dicatat. Pertama, penggunaan skenario curah hujan terbatas pada variasi tertentu (+10% dan +20%), sehingga belum mencerminkan seluruh rentang kemungkinan perubahan iklim. Kedua, parameter geoteknik yang digunakan dalam model diasumsikan homogen dalam skala tertentu, padahal heterogenitas tanah dapat memengaruhi hasil secara signifikan (Karim et al., 2021; He et al., 2022). Ketiga, model belum sepenuhnya mengakomodasi faktor dinamis lain seperti perubahan penggunaan lahan secara temporal atau interaksi vegetasi–akar secara detail. Keempat, keterbatasan resolusi data DEM juga dapat memengaruhi akurasi representasi geometri lereng.

CC BY

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengembangkan model berbasis ensemble climate scenarios guna menangkap ketidakpastian proyeksi iklim secara lebih komprehensif. Selain itu, integrasi model hidro-mekanik terkopel dengan resolusi spasial tinggi dapat meningkatkan akurasi prediksi. Penggunaan data remote sensing multi-temporal juga dapat membantu dalam memantau perubahan kondisi lereng secara dinamis. Pengembangan model berbasis machine learning yang diintegrasikan dengan pendekatan mekanistik juga menjadi arah penelitian yang potensial untuk meningkatkan performa prediksi.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah utama berupa pengembangan kerangka GIS-based climate slope risk mapping yang mengintegrasikan teori stabilitas lereng dan adaptasi perubahan iklim dalam satu sistem analisis terpadu. Kontribusi ini tidak hanya memperkuat pemahaman teoritis tentang kerentanan lereng terhadap perubahan curah hujan, tetapi juga menyediakan alat praktis yang dapat digunakan dalam perencanaan dan mitigasi risiko longsor di era perubahan iklim global.

Simpulan

Penelitian ini bertujuan untuk menyusun peta risiko longsor berbasis perubahan iklim melalui pendekatan kuantitatif terintegrasi yang menggabungkan analisis geoteknik, Geographic Information System (GIS), dan Multi-Criteria Evaluation (MCE). Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi skenario perubahan iklim secara konsisten mengubah tingkat dan distribusi risiko longsor, ditandai oleh penurunan stabilitas lereng dan perluasan zona berisiko tinggi. Temuan utama mengindikasikan bahwa respons lereng terhadap peningkatan curah hujan bersifat sensitif dan non-linear, dengan pergeseran kondisi dari stabil menuju kritis. Selain itu, kemiringan lereng teridentifikasi sebagai faktor dominan yang mengontrol ketidakstabilan, namun pengaruh curah hujan sebagai faktor pemicu menunjukkan peningkatan signifikansi dalam konteks perubahan iklim. Pemetaan berbasis GIS memperlihatkan bahwa risiko longsor tidak hanya meningkat secara intensitas, tetapi juga mengalami redistribusi spasial yang sistematis, khususnya pada wilayah dengan topografi curam dan eksposur hidrologi tinggi.

Secara ilmiah, penelitian ini memberikan kontribusi pada tiga aspek utama. Pertama, dari sisi teori, penelitian ini memperluas kerangka Slope Stability dengan mengintegrasikan dinamika iklim sebagai variabel eksternal yang memengaruhi parameter stabilitas, sekaligus menghubungkannya dengan konsep Climate Adaptation dalam analisis risiko berbasis skenario. Kedua, dari sisi metodologi, penelitian ini mengembangkan pendekatan GIS-based climate slope risk mapping yang menggabungkan indikator mekanistik (Factor of Safety) dengan analisis spasial multi-kriteria, sehingga menghasilkan model yang lebih komprehensif dibandingkan pendekatan konvensional yang terpisah. Ketiga, dari sisi empiris, penelitian ini menyediakan bukti kuantitatif bahwa perubahan curah hujan secara sistematis memengaruhi stabilitas lereng dan distribusi risiko, memperkuat pentingnya integrasi skenario iklim dalam analisis geoteknik modern. Implikasi praktis dari temuan ini mencakup peningkatan akurasi zonasi risiko untuk perencanaan tata ruang, optimasi desain sistem drainase dan stabilisasi lereng, serta penguatan strategi mitigasi berbasis data dalam rekayasa teknik sipil, khususnya di wilayah rawan longsor.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan utama pada cakupan skenario iklim yang masih terbatas serta asumsi homogenitas parameter geoteknik pada skala tertentu, yang berpotensi memengaruhi generalisasi hasil. Oleh karena itu, penelitian lanjutan direkomendasikan untuk mengintegrasikan pendekatan ensemble climate scenarios, memperhitungkan heterogenitas material secara lebih detail, serta mengembangkan model hidro-mekanik terkopel dengan resolusi spasial yang lebih tinggi. Selain itu, eksplorasi integrasi metode berbasis machine learning dengan pendekatan mekanistik dapat menjadi arah strategis untuk meningkatkan akurasi prediksi dan adaptabilitas model. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan

CC BY

pentingnya pendekatan terintegrasi dalam memahami dan memitigasi risiko longsor di era perubahan iklim, serta memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan ilmu teknik sipil secara global.

Daftar Pustaka

Akter, S., Howladar, M. F., Ahmed, Z., Chowdhury, T. R., & Shahnewaz Sayem, S. M. (2022). Assessing the Climatic Influence on River in Bangladesh: In Perspective of Morphology and Discharge of Surma River. *American Journal of Environment and Climate*, *1*(1), 20–27. https://doi.org/10.54536/ajec.v1i1.181

Anugrah, I., & Laksmono, B. (2023). Upaya Mitigasi Kebakaran Hutan dan Lahan Melalui Program CSR Budidaya Madu Hutan Gambut PT Pertamina RU II Sungai Pakning. *Jurnal Teknik Industri Terintegrasi*, *6*(4), 1202–1211. https://doi.org/10.31004/jutin.v6i4.20303

Ardianto, G., Segah, H., Aguswan, Y., Triyadi, A., & Siska, G. (2023). Analysis of Land Cover Change Using Sentinel-2 Images at Natural Laboratory of Peat Swamp Forest Area CIMTROP University of Palangka Raya. *Journal of Peat Science and Innovation*, *1*(1), 32–44. https://doi.org/10.59032/jpsi.v1i1.7541

Ardizzone, F., Gariano, S. L., Volpe, E., Antronico, L., Coscarelli, R., Manunta, M., & Mondini, A. C. (2023). A Procedure for the Quantitative Comparison of Rainfall and DInSAR-Based Surface Displacement Time Series in Slow-Moving Landslides: A Case Study in Southern Italy. *Remote Sensing*, *15*(2), 320. https://doi.org/10.3390/rs15020320

Bozzolan, E., Holcombe, E. A., Pianosi, F., Marchesini, I., Alvioli, M., & Wagener, T. (2023). A mechanistic approach to include climate change and unplanned urban sprawl in landslide susceptibility maps. *Science of The Total Environment*, *858*, 159412. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159412

Bračko, T., Žlender, B., & Jelušič, P. (2022). Implementation of Climate Change Effects on Slope Stability Analysis. *Applied Sciences*, *12*(16), 8171. https://doi.org/10.3390/app12168171

Chen, Y. (2021). *Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) and Simple Additive Weighting (SAW) Methods in Mapping Flood-Prone Areas*. https://doi.org/10.3233/FAIA210274

D'Andrea, M. L. G., Iribarnegaray, M. A., Tejerina, W. A., Barboza, A. G. J. S., Correa, J. J., Rodriguez-Alvarez, M. S., & Seghezzo, L. (2021). Multi-Criteria Assessment Model to Identify Suitable Areas for Treated Wastewater Reuse in Agriculture. *Rica*. https://doi.org/10.20937/rica.53749

Del Vecchio, J., Lathrop, E. R., Dann, J. B., Andresen, C. G., Collins, A. D., Fratkin, M. M., Zwieback, S., Glade, R. C., & Rowland, J. C. (2023). Patterns and rates of soil movement and shallow failures across several small watersheds on the Seward Peninsula, Alaska. *Earth Surface Dynamics*, *11*(2), 227–245. https://doi.org/10.5194/esurf-11-227-2023

Deliveris, A. V, Theocharis, A. I., Koukouzas, N. C., & Zevgolis, I. E. (2022). Numerical Slope Stability Analysis of Deep Excavations Under Rainfall Infiltration. *Geotechnical and Geological Engineering*, *40*(8), 4023–4039. https://doi.org/10.1007/s10706-022-02135-4

Dwinagara, B. (2024). Back Analysis of Rainfall-Induced Waste Dump Failure Using Coupled Hydro-Mechanical Analysis – A Case Study in Coal Mine. *International Journal of Geomate*, *27*(123). https://doi.org/10.21660/2024.123.4618

Farokhzadeh, B., Bazrafshan, O., Singh, V. P., Choobeh, S., & Saravi, M. M. (2022). Future Rainfall

Erosivity Over Iran Based on CMIP5 Climate Models. *Water*, *14*(23), 3861. https://doi.org/10.3390/w14233861

Ferrer, J., Guo, Z., Medina, V., Puig-Polo, C., & Hürlimann, M. (2022). A Framework to Project Future Rainfall Scenarios: An Application to Shallow Landslide-Triggering Summer Rainfall in Wanzhou County China. *Water*, *14*(6), 873. https://doi.org/10.3390/w14060873

Gatto, M. P. A. (2023). Incorporating Rainfall Forecast Data in X-Slip Platform to Predict the Triggering of Rainfall-Induced Shallow Landslides in Real Time. *Geosciences*, *13*(7), 215. https://doi.org/10.3390/geosciences13070215

Ghosh, D., Banerjee, A., Puppala, A. J., & Kumar, P. (2024). Exploring the Influence of Climate Change on Earthen Embankments with Expansive Soil. *Geosciences*, *14*(2), 37. https://doi.org/10.3390/geosciences14020037

He, Y., YU, Z., Zhang, Z., Chen, B., & Zhang, K. (2022). Effects of Rainfall on Mechanical Behaviors of Residual-Soil Landslide. *Frontiers in Earth Science*, *10*. https://doi.org/10.3389/feart.2022.925636

Hossain, I., Imteaz, M. A., Gato-Trinidad, S., & Yilmaz, A. G. (2024). Comparison of Future Design Rainfall With Current Design Rainfall: A Case Study in New South Wales, Australia. *Atmosphere*, *15*(7), 739. https://doi.org/10.3390/atmos15070739

Hou, J., Zhang, Y., Xia, J., Wang, Y., Zhang, S., Pan, X., Yang, M., Leng, G., & Dou, M. (2022). Simulation and Assessment of Projected Climate Change Impacts on Urban Flood Events: Insights From Flooding Characteristic Metrics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *127*(3). https://doi.org/10.1029/2021JD035360

JEMEC AUFLIČ, M., BOKAL, G., KUMELJ, Š., MEDVED, A., DOLINAR, M., & JEŽ, J. (2021). Impact of climate change on landslides in Slovenia in the mid-21st century. *Geologija*, *64*(2), 159–171. https://doi.org/10.5474/geologija.2021.009

Jiang, H., Chen, X., Xu, G., Chen, J., Song, D., Lu, M., Guo, H., & Chen, J. (2025). Plant Adaptation and Soil Shear Strength: Unraveling the Drought Legacy in Amorpha Fruticosa. *Plants*, *14*(2), 179. https://doi.org/10.3390/plants14020179

Jiang, X., Qiu, X.-O., Li, Z., Pan, J., Peng, C., Zuo, X., Liao, Z., & Li, Z. (2022). Small-Sized Versus Standard Magnetic Capsule Endoscopy in Adults: A Two-Center, Double-Blinded Randomized Controlled Trial. *Endoscopy*, *55*(01), 52–57. https://doi.org/10.1055/a-1881-4369

Jug, J., Grabar, K., Bek, A., & Strelec, S. (2024). Stabilization of Shallow Landslides Induced by Rainwater Infiltration—A Case Study From Northern Croatia. *Geotechnics*, *4*(1), 242–263. https://doi.org/10.3390/geotechnics4010013

Jumintono, Wiyatiningsih, S., Relawati, R., Yanita, M., & Santi, I. S. (2022). Palm oil plantation transportation management improving using economic information systems and Qm-Windows. *Economic Annals-XXI*, *198*(7–8), 18–23. https://doi.org/10.21003/ea.V198-02

Júnior, S. M., Casiraghi, Y., Berres, G. W., Leite Frandoloso, M. A., & Rosa, F. D. (2021). Characterization of an area susceptible to floods and inundations in a medium size city in Southern Brazil. *International Journal of Hydrology*, *5*(5), 222–229. https://doi.org/10.15406/ijh.2021.05.00284

Karim, A. A. A., Wilopo, W., Indrawan, I. G. B., & Adriansyah, Y. (2021). Estimating of Maximum Groundwater Level to Trigger Landslide in Batu Hijau Open Pit Mine, West Nusa Tenggara, Indonesia. *Journal of Applied Geology*, *5*(2), 113. https://doi.org/10.22146/jag.58135

Khan, M. A., Ahmad, R., & Khan, H. H. (2022). *Multi-Criteria Land Suitability Analysis for Agriculture Using AHP and Remote Sensing Data of Northern Region India*. https://doi.org/10.5772/intechopen.102432

Kumar, P., Priyanka, P., Uday, K. V., & Dutt, V. (2024). Addressing class imbalance in soil movement predictions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *24*(6), 1913–1928. https://doi.org/10.5194/nhess-24-1913-2024

Latue, T., Latue, P. C., Rakuasa, H., Somae, G., & Muin, A. (2023). Mapping of Landslide Prone Areas in Huamual Sub-District, Seram Bangian Barat Regency, Indonesia. *Jurnal Riset Multidisiplin Dan Inovasi Teknologi*, *1*(02), 84–93. https://doi.org/10.59653/jimat.v1i02.239

Li, X. (2022). Study on Stability and Ecological Restoration of Soil-Covered Rocky Slope of an Abandoned Mine on an Island in Rainy Regions. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(20). https://doi.org/10.3390/su142012959

Lin, Z., Ji, Y., & Sun, X. (2023). Advance Landslide Prediction and Warning Model Based on Stacking Fusion Algorithm. *Mathematics*, *11*(13), 2833. https://doi.org/10.3390/math11132833

Liu, J., Wu, Y., & Gao, X. (2021). Increase in occurrence of large glacier-related landslides in the high mountains of Asia. *Scientific Reports*, *11*(1), 1635. https://doi.org/10.1038/s41598-021-81212-9

Liu, J., & Xu, C. (2024). Construction and Preliminary Analysis of Landslide Database Triggered by Heavy Storm in the Parallel Range-Valley Area of Western Chongqing, China, on 8 June 2017. *Frontiers in Earth Science*, *12*. https://doi.org/10.3389/feart.2024.1420425

Ma, X., Peng, J., Su, Y., Shi, M., Zheng, Y., Li, X., & Jiang, X. (2024). Deformation Characteristics and Activation Dynamics of the Xiaomojiu Landslide in the Upper Jinsha River Basin Revealed by Multi-Track InSAR Analysis. *Remote Sensing*, *16*(11), 1940. https://doi.org/10.3390/rs16111940

Malemnganbi, R., & Shimray, B. A. (2022). An integrated multiple layer perceptron-genetic algorithm decision support system for photovoltaic power plant site selection. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, *12*(2), 1965. https://doi.org/10.11591/ijece.v12i2.pp1965-1972

Mohammadzadeh, S., Scholz, T., & Symmank, L. (2025). Bridging Ecology and Infrastructure: Evaluating the Integrated Benefits of Nature-based Solutions. *Ce/Papers*, *8*(5), 134–141. https://doi.org/10.1002/cepa.3390

Morales, F. F., & de Vries, W. T. (2021). Establishment of Natural Hazards Mapping Criteria Using Analytic Hierarchy Process (AHP). *Frontiers in Sustainability*, *2*. https://doi.org/10.3389/frsus.2021.667105

Nieto, A., Pica, D. E. A., & Stange, T. (2022). Application of LiDAR-Derived Data Using Multi-Criteria Evaluation (MCE) and Stochastic Modelling; A Flood Risk Analysis of the Mersey River, Nova Scotia. *Surg Journal*, *14*(1). https://doi.org/10.21083/surg.v14i1.6713

Olabode, O. P., Lim, H. S., & Ramli, H. (2022). Geophysical and Geotechnical Evaluation of Landslide Slip Surface in a Residual Soil for Monitoring of Slope Instability. *Earth and Space Science*, *9*(12). https://doi.org/10.1029/2022ea002248

Pallathadka, A. (2023). A Local Snow-Ice Hazard Model Using Weighted Overlay Analysis: Predictive Spatial Decision Support System for Hazard Mitigation. *Integrated Journal for Research in Arts and Humanities*, *3*(2), 60–62. https://doi.org/10.55544/ijrah.3.2.10

Phelps, K., Hiesl, P., Hagan, D., & Hotaling Hagan, A. (2021). The Harvest Operability Index (HOI): A

Decision Support Tool for Mechanized Timber Harvesting in Mountainous Terrain. *Forests*, *12*(10), 1307. https://doi.org/10.3390/f12101307

Ravindran, S., & Gratchev, I. (2022). Effect of Water Content on Apparent Cohesion of Soils From Landslide Sites. *Geotechnics*, *2*(2), 385–394. https://doi.org/10.3390/geotechnics2020017

Setyawan, R., Nurtjahjaningtyas, I., & Hidayah, E. (2023). Assessment of Land Erosion Hazard in the Sampean Hulu Sub Watershed, Bondowoso Regency. *Jurnal Teknik Pengairan*, *14*(2), 125–133. https://doi.org/10.21776/ub.pengairan.2023.014.02.3

Shankar Ram, N. R., Sharma, V. K., Mirza, K., Goyal, A., Chowdary, V. M., & Jha, C. S. (2022). *Multi-criteria Based Land and Water Resource Development Planning Using Geospatial Technologies* (pp. 103–123). https://doi.org/10.1007/978-3-030-90479-1_7

Sulca, J., & Rocha, R. P. d. (2021). Influence of the Coupling South Atlantic Convergence Zone-El Niño-Southern Oscillation (SACZ-ENSO) on the Projected Precipitation Changes Over the Central Andes. *Climate*, *9*(5), 77. https://doi.org/10.3390/cli9050077

Tian, W., Peiffer, H., Malengier, B., Liu, G., & Cheng, L. (2023). Modified Equation of Shear Strength With Respect to Saturation. *Applied Sciences*, *13*(7), 4305. https://doi.org/10.3390/app13074305

Uyan, M., & Dogmus, O. L. (2023). An Integrated GIS-Based ANP Analysis for Selecting Solar Farm Installation Locations: Case Study in Cumra Region, Turkey. *Environmental Modeling & Assessment*, *28*(1), 105–119. https://doi.org/10.1007/s10666-022-09870-1

Vargas-León, L. A., & Giraldo-Osorio, J. D. (2024). Analysis of Anomalies Due to the ENSO and Long-Term Changes in Extreme Precipitation Indices Using Data From Ground Stations. *Hydrology*, *11*(1), 7. https://doi.org/10.3390/hydrology11010007

Wang, W., Tianyu, N., Huaiyu, Z., Xu, C., & Li, T. (2025). Experimental Study on Accumulation Layer Landslides Based on Thermosensitive Materials. *Earth Surface Processes and Landforms*, *50*(15). https://doi.org/10.1002/esp.70218

Wu, C.-H. (2024). Assessment of Possible Landslide Susceptibility Under Climate Change: A Case in the Chishan River Watershed in Southwestern Taiwan. *Water*, *16*(23), 3420. https://doi.org/10.3390/w16233420

Yang, C., Wu, J., Li, P., Wang, Y., & Yang, N. (2023). Evaluation of Soil-Water Characteristic Curves for Different Textural Soils Using Fractal Analysis. *Water*, *15*(4), 772. https://doi.org/10.3390/w15040772

Zhang, X., Wang, H., Gao, Z., Ke, X., Zhai, Q., Satyanaga, A., & Chua, Y. S. (2023). Evaluation of the Performance of the Horizontal Drain in Drainage of the Infiltrated Water From Slope Soil Under Rainfall Conditions. *Sustainability*, *15*(19), 14163. https://doi.org/10.3390/su151914163

Zhao, L. Q., Dragićević, S., Balram, S., & Pérez, L. (2025). Assessing the Number of Criteria in <scp>GIS</Scp>-Based Multicriteria Evaluation: A Machine Learning Approach. *Geographical Analysis*, *57*(3), 489–506. https://doi.org/10.1111/gean.70004

Zhou, H., Qiu, J., Li, M., Lü, H. F., & Li, F. (2025). Assessment of Large-Scale Reservoirs' Impact on the Local Precipitation. *Water Resources Research*, *61*(5). https://doi.org/10.1029/2025wr039938

Zhu, Y., Ishikawa, T., Yamada, T. J., & Siva Subramanian, S. (2021). Probability assessment of slope instability in seasonally cold regions under climate change. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, *2*(1), 20. https://doi.org/10.1186/s43065-021-00034-1

Zhu, Y., Ishikawa, T., Zhang, Y., Nguyen, B. T., & Subramanian, S. S. (2022). A FEM-MPM Hybrid Coupled Framework Based on Local Shear Strength Method for Simulating Rainfall/Runoff-Induced Landslide Runout. *Landslides*, *19*(8), 2021–2032. https://doi.org/10.1007/s10346-022-01849-z

Zhu, Y., Zhuang, J., & Zhao, Y. (2024). Failure Process of High-Loess-Filled-Slopes (HLFSs) During Precipitation Under Different Mitigation Measures. *Applied Sciences*, *14*(1), 419. https://doi.org/10.3390/app14010419