

PEMETAAN KERAWANAN TANAH LONGSOR DI HULU DAS TANGGUL

Gatrawan Muchammad Albirru¹, Indra Nurtjahjaningtyas^{*2} dan Entin Hidayah²

¹Mahasiswa Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Jember

²Dosen Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Jember

Korespondensi: indran.teknik@unej.ac.id

ABSTRACT

Landslides are one of the natural disasters that often occur in the Upper Tanggul Watershed. This study aims to produce a landslide susceptibility map based on the Geographic Information System (GIS). Seven landslide conditioning factors used, namely land cover, river density, slope, aspect, elevation, curvature and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Landslide susceptibility areas were mapped using the frequency ratio and weights-of-evidence methods. The accuracy of the landslide susceptibility maps generated from both methods is validated using the Area Under Curve (AUC). The estimation results of the AUC plot show that the susceptibility map using the frequency ratio model has an accuracy of 92,6% and the weights-of-evidence method has an accuracy of 90,1%.

Kata kunci : *susceptibility, frequency ratio, weights-of-evidence*

1. PENDAHULUAN

Tanah longsor adalah gerakan massa batuan, puing-puing dan tanah yang menuruni lereng. Pemicu utama dari terjadinya longsor dangkal adalah curah hujan. Sedangkan untuk longsor karena kegagalan lereng biasanya dipicu oleh air dalam bentuk hujan, pencairan salju ataupun perubahan permukaan air tanah yang cepat. Pemicu signifikan lainnya adalah gempa bumi, letusan gunung berapi, aktivitas manusia, dan erosi selama pelepasan air yang tinggi[1]. Tanah longsor merupakan salah satu bencana yang paling dahsyat di seluruh dunia dan bisa menyebabkan kerusakan fisik hingga hilangnya nyawa manusia[1], [2]. Sekitar 17% dari kematian yang disebabkan oleh bencana alam diseluruh dunia, disebabkan oleh tanah longsor[3]. Oleh karena itu, perlu strategi dan tindakan yang tepat untuk mengurangi risiko tanah longsor, terutama di daerah pegunungan. Pemetaan kerawanan longsor dianggap menjadi langkah awal dalam manajemen risiko tanah longsor dan dapat digunakan sebagai alat untuk memahami pengaruh berbagai kondisi geologis dan faktor pemicu eksternal pada distribusi spasial tanah longsor[4], [5].

Selama beberapa dekade terakhir, banyak model yang telah dikembangkan untuk mengevaluasi kerawanan tanah longsor. Berbagai pendekatan kerentanan tanah longsor telah disarankan dan berhasil diterapkan dengan asumsi bahwa dalam kondisi yang dekat dengan kejadian longsor yang lalu, kejadian longsor dapat diprediksi selama hubungan sebab akibat antara faktor penyebab terbentuk[6]–[9]. Pendekatan untuk kerawanan tanah longsor secara luas diklasifikasikan menjadi dua metodologi utama, yaitu metode kualitatif (langsung) dan metode kuantitatif (tidak langsung)[10]. Metode kualitatif didasarkan pada pengetahuan para ahli, yaitu pemodelan deterministik dan dinamis[11]. Sedangkan metode kuantitatif didasarkan pada pendekatan statistik yang menggabungkan pengetahuan tentang tanah longsor di masa lalu dengan faktor penyebabnya untuk memprediksi daerah rawan longsor[12], [13]. Metode pemetaan kerawanan longsor berbasis statistik merupakan salah satu teknik kuantitatif yang paling berguna untuk mempelajari tanah longsor pada skala regional[14]–[18]. Metode ini adalah teknik berbasis data berdasarkan

persamaan matematika untuk mengintegrasikan pengetahuan pergerakan lereng di masa lalu dengan mempertimbangkan koefisien bobot faktor penyebab tertentu yang berperan penting terhadap pergerakan lereng. Pada teknik ini dihasilkan peta kerawanan longsor dengan menerapkan SIG dan penginderaan jauh dan digunakan untuk berbagai pendekatan mitigasi bahaya[19]–[23].

Beberapa metode kuantitatif yang paling populer adalah rasio frekuensi[24], regresi logistik[25], *fuzzy logic*[26], *weights-of-evidence* (WofE)[27] dan pohon keputusan[28]. Metode rasio frekuensi dan *weights-of-evidence* telah banyak digunakan di bidang bencana tanah longsor sehingga dipilih sebagai metode untuk menghitung bobotan kerawanan longsor pada penelitian ini[29], [30]. Metode rasio frekuensi dianggap sebagai salah satu metode yang mudah diterapkan serta mudah dipahami dan dapat menghasilkan analisis dan pemetaan risiko yang dapat diterima. Selain itu, kinerjanya yang unggul telah dibuktikan di bidang bencana tanah longsor dengan nilai akurasi sebesar 82,4% [31]. Sedangkan untuk metode WofE memiliki nilai akurasi sebesar 82,51%.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan peta kerawanan longsor di Hulu DAS Tanggul. Untuk itu, data terkait tanah longsor dikumpulkan dan disusun menjadi data berbasis spasial. Faktor-faktor pengkondisi banjir dilakukan pembobotan dengan metode rasio frekuensi dan *weights-of-evidence* untuk menemukan model terbaik yang lebih akurat dalam pemetaan kerawanan longsor di wilayah studi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah Longsor

Tanah longsor merupakan perpindahan material pembentuk lereng berupa batuan, bahan rombakan tanah atau material campuran tersebut yang bergerak ke bawah atau keluar lereng[32]. Longsor atau gerakan tanah merupakan suatu peristiwa geologi akibat pergerakan masa batuan atau tanah dengan berbagai tipe dan jenis seperti jatuhnya bebatuan atau gumpalan besar tanah. Faktor-faktor utama penyebab terjadinya tanah longsor antara lain karena lereng yang terjal, tanah yang kurang padat dan tebal, curah hujan yang tinggi, jenis penggunaan lahan, getaran,

adanya material timbunan pada tebing, bekas longsor lama, penggundulan hutan, dan daerah pembuangan sampah. Banyak hal yang mungkin akan ditimbulkan akibat terjadinya tanah longsor terhadap kehidupan manusia, hewan, tumbuhan maupun keseimbangan lingkungan. Bencana tanah longsor ini tentu sangat berdampak bagi kehidupan, khususnya kehidupan manusia. Apabila bencana tanah longsor terjadi pada wilayah dengan kepadatan penduduk yang tinggi, maka akan menimbulkan korban jiwa yang sangat besar, terutama jika bencana longsor terjadi secara tiba-tiba tanpa ada tanda-tanda akan terjadi tanah longsor.

2.2 Metode Rasio Frekuensi

Rasio frekuensi (FR) adalah metode analisis statistik bivariat yang berdasarkan pada distribusi spasial faktor dependen dan pemicu banjir serta faktor penyebab[30]. Metode ini banyak digunakan dalam penelitian untuk pemetaan tanah longsor karena modelnya yang sederhana sehingga mudah dipahami dan diterapkan[33]–[36]. Rasio frekuensi menentukan rasio kejadian bencana terhadap total area dan rasio probabilitas kejadian bencana terhadap ketidakjadian bencana untuk faktor atribut yang diberikan[37]. Semakin kecil rasionya, maka semakin kecil pula hubungan antara kejadian bencana dan faktor yang terkait[38]. Nilai rasio frekuensi dihitung menggunakan persamaan (1) untuk semua kelas faktor pemicu longsor berdasarkan hubungannya dengan inventarisasi longsor.

$$FR = \frac{A/B}{M/N} \quad (1)$$

Dimana A merupakan kejadian tanah longsor untuk setiap kelas dari setiap parameter, B merupakan kejadian longsor di wilayah penelitian, M merupakan luasan setiap kelas parameter dan N merupakan luasan untuk total wilayah penelitian.

Selanjutnya, nilai FR di normalisasi sebagai frekuensi relatif (RF) menggunakan persamaan (2).

$$RF = \frac{\text{Faktor kelas FR}}{\sum \text{Faktor kelas FR}} \quad (2)$$

Setelah dilakukan normalisasi, nilai RF masih memiliki kelemahan dalam mempertimbangkan semua faktor penyebab yang memiliki nilai bobot yang sama. Untuk mengatasi masalah ini dan untuk menemukan hubungan timbal balik antara faktor penyebab longsor, tingkat prediktor (PR) dihitung dengan

memberi peringkat pada seriap faktor penyebab longsor.

$$PR = \frac{RF_{maks} - RF_{min}}{(RF_{maks} - RF_{min})_{min}} \quad (3)$$

Terakhir, indeks kerawanan banjir diperoleh dengan menjumlahkan PR masing-masing faktor dan RF masing-masing kelas.

$$FSI = \sum_{i=1}^n PR_i \times RF_i \quad (4)$$

2.3 Metode *Weights-of-Evidence*

Metode *Weights-of-Evidence* merupakan metode berbasis data kuantitatif yang menggabungkan kumpulan data dan didasarkan pada teori statistic Bayesian[5]. Berdasarkan beberapa studi yang telah menjelaskan perumusan metode *Weights-of-Evidence* secara detail, bobot pada setiap kelas untuk setiap parameter diperoleh berdasarkan terjadi/tidak terjadinya longsor di suatu wilayah[5], [39], [40].

$$W_i^+ = \ln \frac{P\{B|A\}}{P\{\bar{B}|A\}} \quad (5)$$

$$W_i^- = \ln \frac{P\{B|\bar{A}\}}{P\{\bar{B}|\bar{A}\}} \quad (6)$$

Dimana P merupakan probabilitas, B merupakan adanya pengaruh dari parameter yang menyebabkan longsor, \bar{B} merupakan tidak adanya pengaruh dari parameter yang menyebabkan longsor, A merupakan adanya kejadian longsor, \bar{A} merupakan tidak adanya kejadian longsor dan W^+ serta W^- yang merupakan bobot positif dan negatif dari parameter yang mewakili ada/tidaknya pengaruh dari setiap parameter di kejadian longsor. Perbedaan dari berat kedua bobot didefinisikan sebagai kontras (C), digunakan untuk mengukur dan melihat hubungan spasial antara longsor dan fitur bukti.

$$C = W_i^+ - W_i^- \quad (7)$$

Lalu, bobot akhir dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$S^2(W^+) = \frac{1}{N\{B \cap A\}} + \frac{1}{N\{\bar{B} \cap A\}} \quad (8)$$

$$S^2(W^-) = \frac{1}{N\{\bar{B} \cap \bar{A}\}} + \frac{1}{N\{B \cap \bar{A}\}} \quad (9)$$

$$S(C) = \sqrt{S^2(W^+) + S^2(W^-)} \quad (10)$$

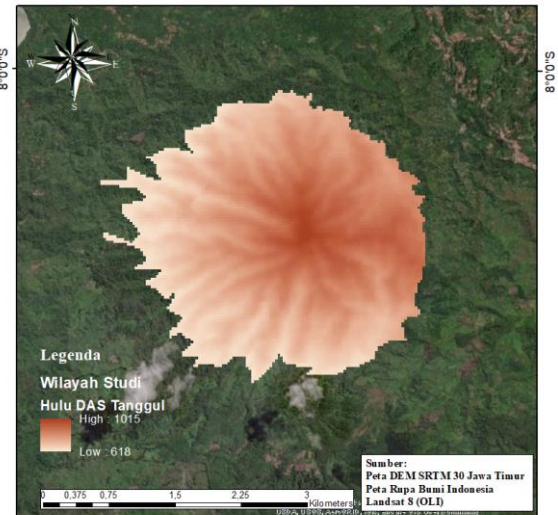
$$W = C/S(C) \quad (11)$$

Dimana $S(W^+)$ dan $S(W^-)$ merupakan varians dari bobot positif dan bobot negatif, serta $S(C)$ merupakan standar deviasi dari C.

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di hulu DAS Tanggul, tepatnya di kawasan Gunung Gambir. Wilayah ini berada di perbatasan antara Kabupaten Jember dan Kabupaten Probolinggo. Wilayah penelitian terletak di antara 8°0' - 8°20' LS dan 113°25' - 113°28' BT. Secara administratif, lokasi penelitian ini meliputi Desa Gelang di Kabupaten Jember serta Desa Tlogoargo dan Desa Andung Biru di Kabupaten Probolinggo. Karakteristik kawasan Gunung Gambir berupa hutan dan perkebunan, yang mana jenis tanahnya sangat subur dan membuat daerahnya dapat digunakan untuk segala jenis kegiatan, sehingga masyarakatnya bergantung pada hasil perkebunan. Oleh karena itu, kawasan Gunung Gambir ini termasuk kedalam jenis desa swadaya.



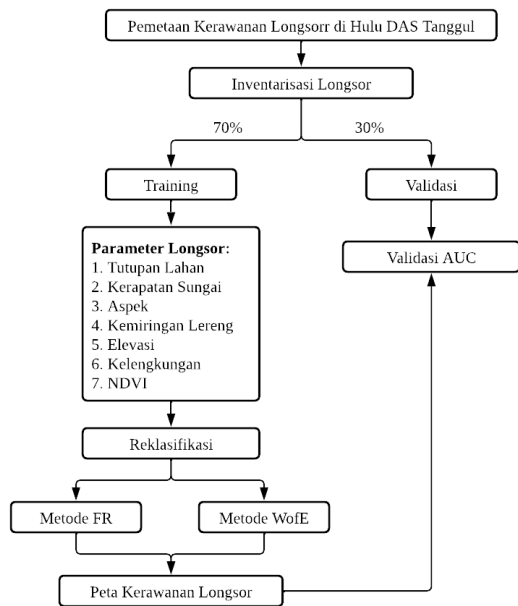
Gambar 1. Lokasi penelitian

3.2 Identifikasi Pemicu Longsor dan Faktor Penyebabnya

Penyelidikan terhadap faktor pemicu longsor dan penyebab longsor perlu dilakukan untuk mengevaluasi kerawanan longsor. Pemilihan faktor pengendalian longsor merupakan langkah yang penting untuk pemetaan bahaya longsor[41], [42]. Metode yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan dalam **Gambar 2**.

Untuk menyiapkan peta kerawanan longsor, diperlukan data dari berbagai citra satelit dan kumpulan data tambahan yang diperoleh dari sumber web. Data yang dibutuhkan antara lain adalah data *Digital Elevation Model* (DEM) dengan resolusi

spasial 30 m dan citra Landsat 8 (OLI) yang dapat diunduh dari situs resmi USGS. Pengolahan data yang diperoleh dilakukan menggunakan ArcGIS 10.3. Pada penelitian ini, peneliti telah mengidentifikasi dan memiliki tujuh faktor penyebab longsor, yaitu tutupan lahan, kerapatan sungai, aspek, kemiringan lereng, elevasi, kelengkungan dan *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI).



Gambar 2. Diagram alir penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemetaan Kerawanan Longsor Menggunakan Metode Rasio Frekuensi

Nilai frekuensi rasio digunakan untuk menghitung korelasi antara kejadian longsor dan faktor pemicu longsor. **Tabel 1** menunjukkan hubungan antara berbagai faktor penyebab banjir, sub-kelas, dan kejadian banjir. Tujuh faktor pemicu banjir, yaitu tutupan lahan, kerapatan sungai, aspek, kemiringan lereng, elevasi, kelengkungan, dan NDVI digunakan dalam penelitian ini. Nilai rasio frekuensi yang lebih tinggi menunjukkan korelasi yang kuat antara faktor pemicu banjir dengan kejadian banjir[43]. Oleh karena itu, nilai yang lebih besar mewakili hubungan yang lebih kuat dan nilai yang lebih kecil mewakili hubungan yang lebih lemah[24].

Tabel 1. Hasil perhitungan FR dan RF

Faktor	Kelas	FR	RF
Tutupan Lahan	Hutan Lahan	0	0
Lahan	Kering		

Faktor	Kelas	FR	RF
	Sekunder		
	Hutan	0	0
	Tanaman		
	Belukar	0	0
	Perkebunan	2,70	1
	Total	2,70	
Kerapatan Sungai	0,23 - 224,31	2,70	0,49
	224,31 - 375,57	1,14	0,21
	375,57 - 507,02	0	0
	507,02 - 679,93	1,49	0,27
	679,93 - 1084,24	2,90	0,52
	Total	5,53	
Aspek	-1 - 76,79	0	0
	76,69 - 158,83	2,49	0,57
	158,83 - 228,13	1,53	0,35
	228,13 - 293,20	0	0
	293,20 - 358,26	0,35	0,08
	Total	4,38	
Kemiringan Lereng	0 - 10,18	0	0
	10,18 - 16,50	0,86	0,23
	16,50 - 22,47	1,71	0,46
	22,47 - 29,32	0,36	0,10
	29,32 - 44,77	0,79	0,21
	Total	3,72	
Elevasi	618 - 690	0,37	0,11
	690 - 753	1,70	0,48
	753 - 817	1,46	0,41
	817 - 885	0,38	0,11
	885 - 1015	0	0
	Total	3,54	
Kelengkungan	-6,67 - -1,78	1,99	0,48
	-1,78 - -0,56	1,66	0,40
	-0,56 - 0,56	1,18	0,29
	0,56 - 1,78	0	0
	1,78 - 6,11	1,30	0,31
	Total	4,14	
NDVI	-0,59 - -0,44	0,57	0,13
	-0,44 - -0,32	0,67	0,15
	-0,32 - -0,22	0	0
	-0,22 - -0,14	1,77	0,41
	-0,14 - -0,05	1,33	0,31

Faktor	Kelas	FR	RF
Total		4,33	

Pola penggunaan lahan menggambarkan jenis pemanfaatan lahan oleh masyarakat dan proses alam. Bobot tertinggi dari faktor ini adalah perkebunan dengan nilai frekuensi rasio sebesar 2,7. Sedangkan penggunaan lahan berupa hutan lahan kering sekunder, hutan tanaman dan belukar memiliki bobot yang sama, yaitu 0 yang berarti tidak berpengaruh terhadap kejadian longsor.

Kerapatan sungai berdampak buruk terhadap longsor karena efek kejenuhan material terkait lereng menghasilkan pengurangan stabilitas lereng[44]. Lereng yang mendekati kerapatan sungai diperkirakan lebih banyak terjadi longsor. Hasil faktor kerapatan sungai menunjukkan bahwa kelas dengan kerapatan sungai maksimum, yaitu 679,93 – 1084,24, lebih rawan terhadap kejadian longsor dengan nilai rasio frekuensi sebesar 2,90.

Aspek mewakili arah kompas yang dihadapi sel di lokasinya. Faktor ini dapat mengkondisikan tutupan lahan dan penguapan air pada suatu lereng dengan mempengaruhi paparan radiasi matahari[10], [45]. Nilai -1 merupakan nilai yang diberikan ketika sel tidak memiliki arah kemiringan, yaitu datar[27]. Hasil perhitungan faktor aspek menunjukkan bahwa sel yang tidak memiliki arah kemiringan atau datar tidak berpengaruh terhadap terjadinya longsor. Kelas aspek yang paling berpengaruh terhadap kejadian longsor adalah kelas kedua (76,69 – 158,83) dengan nilai frekuensi rasio sebesar 2,49.

Kemiringan lereng biasanya dianggap sebagai salah satu faktor terpenting yang mempengaruhi stabilitas lereng, karena tidak hanya menyebabkan deformasi gravitasi tetapi juga mengontrol distribusi tegangan[46]. Peta menunjukkan bahwa kemiringan lereng berkisar antara 0° – 44,7°. Faktor kemiringan lereng yang paling berpengaruh terhadap kejadian longsor adalah pada kelas kemiringan lereng 16,50° – 22,47° dengan nilai rasio frekuensi sebesar 1,71. Sedangkan pada kelas kemiringan lereng terendah, yaitu 0 – 10,18, tidak berpengaruh terhadap kejadian longsor dengan nilai rasio frekuensi 0.

Elevasi berkontribusi terhadap terjadinya tanah longsor karena pengaturan lereng bervariasi dengan ketinggian, seperti tutupan lahan, iklim dan aktivitas manusia[47].

Ketinggian juga mewakili energi potensial yang terkait dengan lereng. Kelas elevasi kedua (690 – 753) memiliki nilai rasio frekuensi tertinggi (1,70) dan demikian memiliki dampak terbesar terhadap kejadian longsor. Pada umumnya ketika elevasi meningkat, nilai rasio frekuensi menurun, sehingga nilai elevasi terendah dan tertinggi masing-masing memiliki dampak terbesar dan terkecil terhadap kejadian longsor[48].

Hubungan antara kejadian longsor dan kelengkungan yaitu daerah cekung (daerah dengan nilai kelengkungan negatif) memiliki peluang terjadinya longsor yang lebih tinggi daripada daerah yang cembung (daerah dengan nilai kelengkungan positif). Hal ini dikarenakan setelah hujan deras, lereng cekung mengandung lebih banyak air dan menahan air tersebut untuk waktu yang lebih lama[49]. Hal ini terlihat pada hasil perhitungan, bahwa nilai kelengkungan terendah memiliki nilai rasio frekuensi yang terbesar, yaitu sebesar 1,99.

Faktor penyebab longsor yang terakhir adalah NDVI. NDVI merupakan indikator yang mengungkapkan kerapatan vegetasi dalam penilaian kerawanan longsor, dengan NDVI yang lebih besar mewakili tutupan vegetasi yang lebih padat[27]. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai rasio frekuensi pada faktor NDVI yang tertinggi dimiliki oleh dua kelas terakhir, yaitu kelas -0,22 – -0,14 dan kelas -0,14 – -0,05 dengan nilai rasio frekuensi berturut-turut sebesar 1,77 dan 1,33.

Setelah persiapan ketujuh faktor penyebab longsor dan memberikan bobot pada setiap parameter menggunakan FR dan RF, peta kerawanan longsor diperoleh dengan menjumlahkan setiap faktor PR dan setiap kelas RF menggunakan proses *raster calculator* pada ArcGIS 10.3.

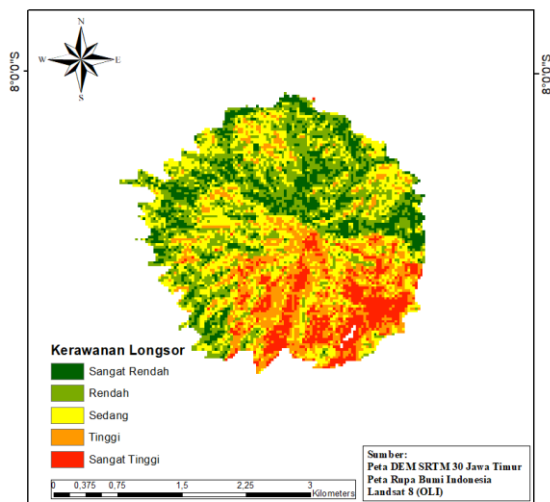
Tabel 2. Perhitungan bobot PR

Faktor	PR
Tutupan Lahan	2,70
Kerapatan Sungai	5,53
Aspek	4,38
Kemiringan Lereng	3,72
Elevasi	3,54
Kelengkungan	4,14
NDVI	4,33

Nilai kerawanan longsor dibagi menjadi menjadi lima sub-kelas dengan menggunakan metode *natural breaks*, yaitu kelas sangat rendah, rendah, sedang, tinggi dan sangat tinggi dan ditunjukkan dalam **Gambar 3**. Analisis tersebut menggambarkan bahwa sekitar 30% dari total luas wilayah berada pada zona rawan longsor sangat tinggi dan tinggi, 27% pada zona sedang, 27% pada zona rendah dan 15% pada zona aman.

Tabel 3. Indeks kerawanan longsor metode FR

No	Kelas Rawan	Luas (piksel)	%
1	Sangat Rendah	1318	14,94
2	Rendah	2414	27,36
3	Sedang	2438	27,63
4	Tinggi	1715	19,44
5	Sangat Tinggi	939	10,64
Total		8824	100



Gambar 3. Peta kerawanan longsor metode FR

Di wilayah studi, kerapatan sungai memiliki kontribusi terbesar terhadap longsor dengan nilai PR 5,53 yang diikuti oleh aspek dan NDVI dengan nilai PR masing-masing 4,38 dan 4,33. Kelengkungan dan kemiringan memiliki pengaruh sedang terhadap kejadian longsor dengan nilai PR masing-masing 4,14 dan 3,72. Sedangkan elevasi dan tutupan lahan merupakan faktor yang paling tidak berpengaruh dengan nilai PR masing-masing 3,54 dan 2,70. **Gambar 3** menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah berisiko sangat tinggi dan tinggi berada di daerah dengan kemiringan

lereng relatif rendah, kelengkungan datar, dan kerapatan sungai yang lebih tinggi. Dari peta kerawanan yang terbentuk, dapat dilihat bahwa wilayah perkebunan atau orang yang tinggal di zona rawan longsor tinggi dan sangat tinggi sangat rawan terhadap kejadian longsor di masa depan di wilayah studi.

4.2 Pemetaan Kerawanan Longsor Menggunakan Metode *Weights-of-Evidence*

Seperti metode rasio frekuensi, metode *weights-of-evidence* digunakan untuk menentukan hubungan antara kejadian longsor dan faktor pemicu longsor yang ditunjukkan pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Pembobotan metode WofE

Faktor	Kelas	W _{final}
Tutupan Lahan	Hutan Lahan Kering Sekunder	-0,10
	Hutan Tanaman	-1,46
	Belukar	-0,94
	Perkebunan	3,29
	Total	2,70
Kerapatan Sungai	0,23 - 224,31	1,80
	224,31 - 375,57	0,27
	375,57 - 507,02	-1,15
	507,02 - 679,93	0,80
	679,93 - 1084,24	1,55
Total	5,53	
Aspek	-1 - 76,79	-0,79
	76,69 - 158,83	2,18
	158,83 - 228,13	1,13
	228,13 - 293,20	-1,01
	293,20 - 358,26	-1,19
Total	4,38	
Kemiringan Lereng	0 - 10,18	-0,64
	10,18 - 16,50	-0,31
	16,50 - 22,47	1,55
	22,47 - 29,32	-1,14
	29,32 - 44,77	-0,26
Total	3,72	
Elevasi	618 - 690	-1,13
	690 - 753	1,38
	753 - 817	0,88
	817 - 885	-1,11
	885 - 1015	-0,58
Total	3,54	

Faktor	Kelas	W_{final}
Kelengkungan	-6,67 - -1,78	1,03
	-1,78 - -0,56	1,17
	-0,56 - 0,56	0,43
	0,56 - 1,78	-0,95
	1,78 - 6,11	0,27
Total		4,14
NDVI	-0,59 - -0,44	-0,60
	-0,44 - -0,32	-0,44
	-0,32 - -0,22	-0,63
	-0,22 - -0,14	1,45
	-0,14 - -0,05	0,66
Total		4,33

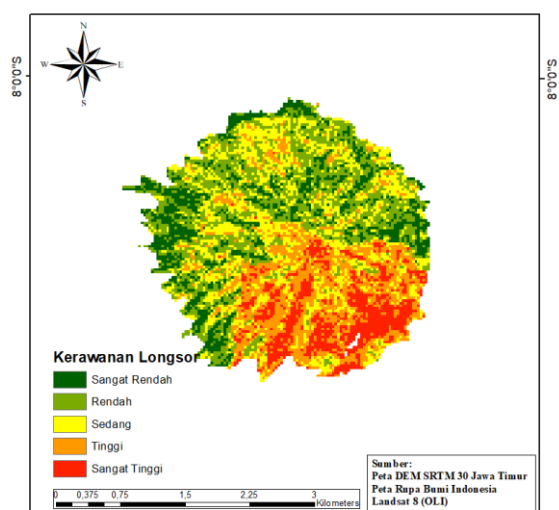
Berdasarkan nilai W_{final} dari **Tabel 4**, untuk faktor penggunaan lahan, kelas perkebunan memiliki nilai tertinggi yaitu 3,29. Namun, untuk kelas hutan lahan kering sekunder, hutan tanaman dan semak belukar memiliki pengaruh negative terhadap longsor yang menunjukkan bahwa tidak ada hubungan yang signifikan antara kelas tersebut dengan kejadian longsor. Untuk faktor penyebab yang kedua, yaitu kerapatan sungai, kelas pertama 0,23 – 224,31 dengan nilai 1,80 memiliki pengaruh paling besar terhadap kejadian longsor. Semua kelas berpengaruh positif terhadap kejadian longsor, kecuali pada kelas 375,57 – 507,02 berpengaruh negatif terhadap kejadian longsor dengan nilai -1,15. Untuk faktor aspek, pada kelas kedua dan ketiga memiliki pengaruh positif terhadap kejadian longsor, sedangkan kelas pertama, keempat dan kelima memiliki pengaruh negatif terhadap kejadian longsor. Kelas kedua dengan nilai 2,18 memiliki pengaruh paling besar dan kelas kelima dengan nilai -1,19 memiliki pengaruh paling kecil terhadap kejadian banjir. Pada faktor kemiringan lereng, semua kelas berpengaruh negatif, hanya pada kelas 16,50 – 22,47 yang berpengaruh positif dan signifikan terhadap kejadian longsor dengan nilai 1,55. Dalam kasus faktor elevasi, kelas kedua dan ketiga memiliki pengaruh positif terhadap kejadian longsor, sedangkan kelas yang lainnya memiliki pengaruh negatif. Kelas 690 – 753 memiliki dampak paling besar dengan nilai 1,38. Untuk faktor kelengkungan, hampir semua kelas berpengaruh positif terhadap kejadian banjir. Hanya saja, pada kelas 0,56 – 1,78 memiliki tidak terlalu berdampak terhadap

kejadian banjir dengan nilai -0,95. Faktor penyebab longsor yang terakhir adalah NDVI. Untuk 3 kelas pertama, yaitu kelas -0,59 – -0,44, -0,44 – -0,32 dan -0,32 – -0,22 tidak terlalu berdampak terhadap kejadian longsor karena nilainya yang negatif. Sedangkan pada dua kelas terakhir memiliki nilai positif yang berarti berpengaruh terhadap kejadian longsor.

Tabel 5. Indeks kerawanan longsor metode WofE

No	Faktor	Luas (piksel)	%
1	Sangat Rendah	1320	14,96
2	Rendah	2421	27,44
3	Sedang	2204	24,98
4	Tinggi	1828	20,72
5	Sangat Tinggi	1051	11,91
	Total	8824	100

Selanjutnya, peta kerawanan longsor diperoleh dengan menjumlahkan nilai W_{final} pada setiap faktor menggunakan proses *raster calculator* pada ArcGIS 10.3. Nilai kerawanan longsor dibagi menjadi menjadi lima sub-kelas dengan menggunakan metode *natural breaks*, yaitu kelas sangat rendah, rendah, sedang, tinggi dan sangat tinggi. Dari hasil analisis tersebut menggambarkan bahwa sekitar 32% dari total luas wilayah berada pada zona rawan longsor sangat tinggi dan tinggi, 25% pada zona sedang, 27% pada zona rendah dan 15% pada zona aman.

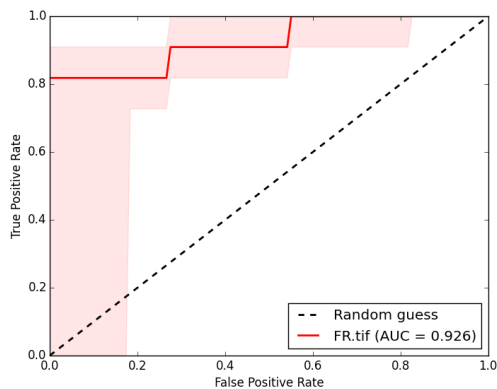


Gambar 4. Peta kerawanan longsor metode WofE

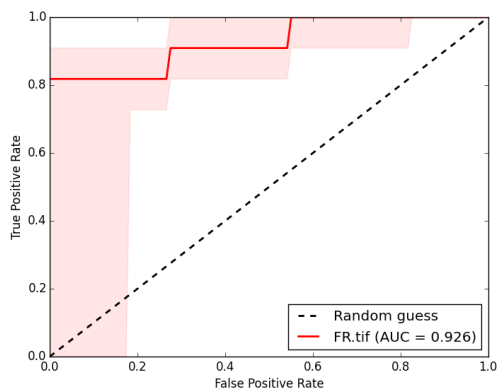
4.3 Validasi Peta Kerawanan Longsor

Validasi peta yang sudah terbentuk merupakan langkah penting dalam pengembangan dan identifikasi daerah rawan serta penentuan kualitasnya[50]. Jadi, hasil model tidak akan dapat diterapkan apabila tidak dilakukan validasi[25], [51]. Validasi yang digunakan adalah metode *Receiver Operating Characteristic* (ROC). Metode ini merupakan metode yang paling populer untuk mengevaluasi keakuratan hasil karena sifatnya yang umum, dapat dipahami dan digunakan oleh banyak peneliti[24], [43], [50], [52]–[55].

Dalam melakukan validasi peta kerawanan banjir, digunakan kurva laju prediksi dari masing-masing peta kerawanan longsor[17]. Tingkat keberhasilan dihasilkan dari 70% data (*training*) dan peta prediksi dihasilkan dari 30% data (validasi)[17], [56]. *Area Under Curve* (AUC) tingkat prediksi menunjukkan seberapa baik model memprediksi longsor[17], [38]. Hasil kurva tingkat prediksi ditunjukkan pada **Gambar 4** dan **Gambar 5**.



Gambar 5. Kurva AUC metode FR



Gambar 6. Kurva AUC metode WofE

Metode rasio frekuensi memiliki nilai AUC sebesar 92,6%. Sedangkan metode

weights-of-evidence memiliki nilai AUC sebesar 90,1%. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa metode yang paling akurat dalam pembuatan peta kerawanan longsor di Hulu DAS Tanggul adalah metode rasio frekuensi, karena memiliki *area under curve* yang lebih tinggi dan tingkat akurasi yang lebih tinggi daripada metode *weights-of-evidence*. Hasil penelitian ini konsisten dengan penelitian terdahulu mengenai pemetaan bencana alam[53], [57]–[59].

4.4 Perbandingan Kelas Kerawanan Longsor

Berdasarkan peta kerawanan longsor, terdapat lima kelas kerawanan yaitu sangat rendah, rendah, sedang, tinggi dan sangat tinggi. Berdasarkan peta rasio frekuensi yang memiliki tingkat akurasi yang lebih tinggi dalam memprediksi kerawanan longsor, 10,64% dari total wilayah berada pada kelas kerawanan sangat tinggi, 19,44% di kelas tinggi, 27,63% di kelas sedang, 27,36% di kelas rendah dan 14,94% berada di kelas kerawanan sangat rendah. Untuk metode *weights-of-evidence* kelas sangat tinggi, tinggi, sedang, rendah dan sangat rendah nilainya berturut-turut adalah 11,91%, 20,72%, 24,98%, 27,44% dan 14,96%.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Tanah longsor merupakan bencana paling dahsyat di dunia yang dapat menyebabkan kerusakan fisik hingga hilangnya nyawa manusia. Pembuatan peta kerawanan longsor menjadi sangat penting dan merupakan langkah awal dalam pengurangan risiko akibat longsor. Karena kurangnya informasi di sebagian besar DAS, banyak peneliti yang menggunakan analisis spasial dalam SIG untuk studi hidrologi karena akurasi dan kecepatannya yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan peta kerawanan banjir di Hulu DAS Tanggul dengan metode rasio frekuensi dan *weights-of-evidence*. Tujuh faktor penyebab banjir disiapkan dalam penelitian ini, yaitu penggunaan lahan, kerapatan sungai, aspek kemiringan lereng, elevasi, kelengkungan dan NDVI. Faktor-faktor ini digunakan untuk mengkorelasikan longsor dengan masing-masing kelas faktor penyebab dan kemudian menilai kerawanan longsor menurut metode rasio frekuensi dan

weights-of-evidence. Peta kerawanan longsor dibangun dan diklasifikasikan ke dalam lima kategori. Hasil peta yang dibuat merepresentasikan daerah rawan yang sangat rendah, rendah, sedang, tinggi dan sangat tinggi. Tingkat keberhasilan tertinggi dimiliki oleh metode rasio frekuensi dengan nilai AUC sebesar 92,6%, lalu diikuti oleh metode *weights-of-evidence* dengan nilai AUC sebesar 90,1%. Peta kerawanan longsor ini dapat membantu instansi terkait dalam pengambilan keputusan dan tindakan yang tepat untuk mengendalikan dan mengurangi dampak akibat bencana longsor di masa mendatang.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] U. Haque *et al.*, “The human cost of global warming: Deadly landslides and their triggers (1995–2014),” *Sci. Total Environ.*, vol. 682, pp. 673–684, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.415.
- [2] M. J. Froude and D. N. Petley, “Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016,” *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 18, no. 8, pp. 2161–2181, 2018, doi: 10.5194/nhess-18-2161-2018.
- [3] S. Lacasse, F. Nadim, and B. Kalsnes, “Living with Landslide Risk,” *Geotech. Eng. J. SEAGS AGSSEA*, vol. 41, no. 4, 2010.
- [4] R. Fell, J. Corominas, C. Bonnard, L. Cascini, E. Leroi, and W. Z. Savage, “Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning,” *Eng. Geol.*, vol. 102, no. 3–4, pp. 85–98, 2008, doi: 10.1016/j.enggeo.2008.03.022.
- [5] S. Zhu *et al.*, “Integrating principal component analysis with statistically-based models for analysis of causal factors and landslide susceptibility mapping: A comparative study from the Loess Plateau area in Shanxi (China),” *Build. Environ.*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124159>.
- [6] C. Zhao, W. Chen, Q. Wang, Y. Wu, and B. Yang, “A comparative study of statistical index and certainty factor models in landslide susceptibility mapping: a case study for the Shangzhou District, Shaanxi Province, China,” *Arab. J. Geosci.*, vol. 8, no. 11, pp. 9079–9088, 2015, doi: 10.1007/s12517-015-1891-7.
- [7] Y. Wu *et al.*, “Landslide susceptibility assessment using frequency ratio, statistical index and certainty factor models for the Gangu County, China,” *Arab. J. Geosci.*, vol. 9, no. 2, pp. 1–16, 2016, doi: 10.1007/s12517-015-2112-0.
- [8] H. Hong, S. A. Naghibi, H. R. Pourghasemi, and B. Pradhan, “GIS-based landslide spatial modeling in Ganzhou City, China,” *Arab. J. Geosci.*, vol. 9, no. 2, pp. 1–26, 2016, doi: 10.1007/s12517-015-2094-y.
- [9] R. S. Banshtu, L. D. Versain, and D. D. Pandey, “Risk assessment using quantitative approach: Central Himalaya, Kullu, Himachal Pradesh, India,” *Arab. J. Geosci.*, vol. 13, no. 5, 2020, doi: 10.1007/s12517-020-5143-0.
- [10] J. Corominas *et al.*, “Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk,” *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 73, no. 2, pp. 209–263, 2013, doi: 10.1007/s10064-013-0538-8.
- [11] A. Aditian, T. Kubota, and Y. Shinohara, “Comparison of GIS-based landslide susceptibility models using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network in a tertiary region of Ambon, Indonesia,” *Geomorphology*, vol. 318, pp. 101–111, 2018, doi: 10.1016/j.geomorph.2018.06.006.
- [12] D. H. Lee, Y. T. Kim, and S. R. Lee, “Shallow landslide susceptibility models based on artificial neural networks considering the factor selection method and various non-linear activation functions,” *Remote Sens.*, vol. 12, no. 7, 2020, doi: 10.3390/rs12071194.
- [13] C. J. van Westen, T. W. J. van Asch, and R. Soeters, “Landslide hazard and risk zonation - Why is it still so difficult?,” *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 65, no. 2, pp. 167–184, 2006, doi: 10.1007/s10064-005-0023-0.
- [14] A. Yalcin, S. Reis, A. C. Aydinoglu, and T. Yomralioglu, “A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey,” *Catena*, vol. 85, no. 3, pp. 274–287, 2011, doi: 10.1016/j.catena.2011.01.014.
- [15] P. Kumar Rai, K. Mohan, and V. K. Kumra, “Landslide Hazard and Its Mapping Using Remote Sensing and Gis,” *J. Sci. Res.*, vol. 58, no. ii, pp. 1–13, 2014.
- [16] P. Aleotti and R. Chowdhury, “Landslide hazard assessment: Summary review and new perspectives,” *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 58, no. 1, pp. 21–44, 1999, doi: 10.1007/s100640050066.

- [17] D. T. Bui, O. Lofman, I. Revhaug, and O. Dick, "Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression," *Nat. Hazards*, vol. 59, no. 3, pp. 1413–1444, 2011, doi: 10.1007/s11069-011-9844-2.
- [18] F. Guzzetti, "Landslide hazard assessment and risk evaluation: limits and perspectives," *Proc. 4th EGS Plinius Conf.*, no. October 2002, pp. 1–4, 2003.
- [19] A. Kaviani and H. Ahmadi, "Landslide susceptibility analysis with a bivariate approach and GIS in Northern Iran," *Arab. J. Geosci.*, vol. 2, no. 1, pp. 95–101, 2009, doi: 10.1007/s12517-008-0022-0.
- [20] H. Shahabi, B. B. Ahmad, and S. Khezri, "Evaluation and comparison of bivariate and multivariate statistical methods for landslide susceptibility mapping (case study: Zab basin)," *Arab. J. Geosci.*, vol. 6, no. 10, pp. 3885–3907, 2013, doi: 10.1007/s12517-012-0650-2.
- [21] X. G. Wang, W. Wang, D. Huang, B. Yong, and X. Chen, "Modifying SEBAL model based on the trapezoidal relationship between land surface temperature and vegetation index for actual evapotranspiration estimation," *Remote Sens.*, vol. 6, no. 7, pp. 5909–5937, 2014, doi: 10.3390/rs6075909.
- [22] X. Zhao and W. Chen, "GIS-based evaluation of landslide susceptibility models using certainty factors and functional trees-based ensemble techniques," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 1, 2020, doi: 10.3390/app10010016.
- [23] W. Chen, L. Fan, C. Li, and B. T. Pham, "Spatial prediction of landslides using hybrid integration of artificial intelligence algorithms with frequency ratio and index of entropy in Nanzheng county, China," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–21, 2020, doi: 10.3390/app10010029.
- [24] B. Pradhan, S. Mansor, S. Pirasteh, and M. F. Buchroithner, "Landslide hazard and risk analyses at a landslide prone catchment area using statistical based geospatial model," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 32, no. 14, pp. 4075–4087, 2011, doi: 10.1080/01431161.2010.484433.
- [25] H. Nampak, B. Pradhan, and M. A. Manap, "Application of GIS based data driven evidential belief function model to predict groundwater potential zonation," *J. Hydrol.*, vol. 513, pp. 283–300, 2014, doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.02.053.
- [26] H. R. Pourghasemi, B. Pradhan, and C. Gokceoglu, "Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran," *Nat. Hazards*, vol. 63, no. 2, pp. 965–996, 2012, doi: 10.1007/s11069-012-0217-2.
- [27] Y. Tang *et al.*, "Integrating principal component analysis with statistically-based models for analysis of causal factors and landslide susceptibility mapping: A comparative study from the loess plateau area in Shanxi (China)," *J. Clean. Prod.*, vol. 277, p. 124159, 2020.
- [28] C. P. Poudyal, "Landslide susceptibility analysis using decision tree method, Phidim, Eastern Nepal," *Bull. Dep. Geol.*, vol. 15, pp. 69–76, 2013, doi: 10.3126/bdg.v15i0.7419.
- [29] Y. Wang, D. Sun, H. Wen, H. Zhang, and F. Zhang, "Comparison of random forest model and frequency ratio model for landslide susceptibility mapping (LSM) in Yunyang county (Chongqing, China)," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 12, pp. 1–39, 2020, doi: 10.3390/ijerph17124206.
- [30] K. Ullah and J. Zhang, "GIS-based flood hazard mapping using relative frequency ratio method: A case study of panjkora river basin, eastern Hindu Kush, Pakistan," *PLoS One*, vol. 15, no. 3, pp. 1–18, 2020, doi: 10.1371/journal.pone.0229153.
- [31] H. G. Abdo, "Assessment of landslide susceptibility zonation using frequency ratio and statistical index: a case study of Al-Fawar basin, Tartous, Syria," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 4, pp. 2599–2618, 2022, doi: 10.1007/s13762-021-03322-1.
- [32] H. Yuniarta, A. P. Saido, and Y. M. Purwana, "Kerawanan Bencana Tanah Longsor Kabupaten Ponorogo," *Matriks Tek. Sipil*, pp. 194–201, 2015.
- [33] A. Y. Aksaray, R. Aksaray, D. Model, A. Hierarchy, and P. View, "A GIS-based comparative study of frequency ratio , analytical hierarchy process , bivariate statistics and logistics regression ...," no. December 2013, 2011.
- [34] C. Cao, P. Xu, Y. Wang, J. Chen, L. Zheng, and C. Niu, "Flash flood hazard susceptibility mapping using frequency ratio and statistical index methods in coalmine subsidence areas," *Sustain.*, vol. 8, no. 9, 2016, doi: 10.3390/su8090948.
- [35] H. Khan, M. Shafique, M. A. Khan, M. A. Bacha, S. U. Shah, and C. Calligaris, "Landslide susceptibility assessment using

- Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan,” *Egypt. J. Remote Sens. Sp. Sci.*, vol. 22, no. 1, pp. 11–24, 2019, doi: 10.1016/j.ejrs.2018.03.004.
- [36] E. Nohani *et al.*, “Landslide susceptibility mapping using different GIS-Based bivariate models,” *Water (Switzerland)*, vol. 11, no. 7, pp. 1–22, 2019, doi: 10.3390/w11071402.
- [37] M. C. Popa, D. Peptenatu, C. C. Draghici, and D. C. Diaconu, “Flood hazard mapping using the flood and Flash-Flood Potential Index in the Buzau River catchment, Romania,” *Water (Switzerland)*, vol. 11, no. 10, 2019, doi: 10.3390/w11102116.
- [38] S. Lee and B. Pradhan, “Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models,” *Landslides*, vol. 4, no. 1, pp. 33–41, 2007, doi: 10.1007/s10346-006-0047-y.
- [39] J. Torizin, “Elimination of informational redundancy in the weight of evidence method: an application to landslide susceptibility assessment,” *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, vol. 30, no. 2, pp. 635–651, 2015, doi: 10.1007/s00477-015-1077-6.
- [40] A. Ozdemir and T. Altural, “A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan mountains, SW Turkey,” *J. Asian Earth Sci.*, vol. 64, pp. 180–197, 2013, doi: 10.1016/j.jseae.2012.12.014.
- [41] S. Farooq and M. S. Akram, “Landslide susceptibility mapping using information value method in Jhelum Valley of the Himalayas,” *Arab. J. Geosci.*, vol. 14, no. 10, 2021, doi: 10.1007/s12517-021-07147-7.
- [42] M. Francioni *et al.*, “A multi-disciplinary approach to the study of large rock avalanches combining remote sensing, GIS and field surveys: The case of the Scanno landslide, Italy,” *Remote Sens.*, vol. 11, no. 13, 2019, doi: 10.3390/rs11131570.
- [43] M. S. Tehrany, B. Pradhan, and M. N. Jebur, “Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS,” *J. Hydrol.*, vol. 504, pp. 69–79, 2013, doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.09.034.
- [44] W. Chen *et al.*, “A comparative study of logistic model tree, random forest, and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility,” *Catena*, vol. 151, pp. 147–160, 2017, doi: 10.1016/j.catena.2016.11.032.
- [45] X. Wang *et al.*, “Landslide susceptibility evaluation based on potential disaster identification and ensemble learning,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, pp. 1–22, 2022.
- [46] Q. Deng, M. Fu, X. Ren, F. Liu, and H. Tang, “Precedent long-term gravitational deformation of large scale landslides in the Three Gorges reservoir area, China,” *Eng. Geol.*, vol. 221, pp. 170–183, 2017, doi: 10.1016/j.enggeo.2017.02.017.
- [47] H. R. Pourghasemi, A. Gayen, S. Park, C. W. Lee, and S. Lee, “Assessment of landslide-prone areas and their zonation using logistic regression, LogitBoost, and naïvebayes machine-learning algorithms,” *Sustain.*, vol. 10, no. 10, 2018, doi: 10.3390/su10103697.
- [48] K. Khosravi, E. Nohani, E. Maroufinia, and H. R. Pourghasemi, “A GIS-based flood susceptibility assessment and its mapping in Iran: a comparison between frequency ratio and weights-of-evidence bivariate statistical models with multi-criteria decision-making technique,” *Nat. Hazards*, vol. 83, no. 2, pp. 947–987, 2016, doi: 10.1007/s11069-016-2357-2.
- [49] S. Lee and T. Sambath, “Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models,” *Environ. Geol.*, vol. 50, no. 6, pp. 847–855, 2006, doi: 10.1007/s00254-006-0256-7.
- [50] H. R. Pourghasemi, M. Mohammady, and B. Pradhan, “Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran,” *Catena*, vol. 97, pp. 71–84, 2012, doi: 10.1016/j.catena.2012.05.005.
- [51] C. J. F. Chung and A. G. Fabbri, “Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping,” *Nat. Hazards*, vol. 30, no. 3, pp. 451–472, 2003, doi: 10.1023/B:NHAZ.0000007172.62651.2b.
- [52] B. Pradhan and S. Lee, “Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models,” *Environ. Earth Sci.*, vol. 60, no. 5, pp. 1037–1054, 2010, doi: 10.1007/s12665-009-0245-8.
- [53] M. Mohammady, H. R. Pourghasemi, and B. Pradhan, “Landslide susceptibility mapping

- at Golestan Province, Iran: A comparison between frequency ratio, Dempster-Shafer, and weights-of-evidence models,” *J. Asian Earth Sci.*, vol. 61, pp. 221–236, 2012, doi: 10.1016/j.jseaes.2012.10.005.
- [54] M. S. Tehrany, M. J. Lee, B. Pradhan, M. N. Jebur, and S. Lee, “Flood susceptibility mapping using integrated bivariate and multivariate statistical models,” *Environ. Earth Sci.*, vol. 72, no. 10, pp. 4001–4015, 2014, doi: 10.1007/s12665-014-3289-3.
- [55] M. S. Tehrany, B. Pradhan, and M. N. Jebur, “Flood susceptibility analysis and its verification using a novel ensemble support vector machine and frequency ratio method,” *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, vol. 29, no. 4, pp. 1149–1165, 2015, doi: 10.1007/s00477-015-1021-9.
- [56] D. Tien Bui, B. Pradhan, O. Lofman, I. Revhaug, and O. B. Dick, “Spatial prediction of landslide hazards in Hoa Binh province (Vietnam): A comparative assessment of the efficacy of evidential belief functions and fuzzy logic models,” *Catena*, vol. 96, pp. 28–40, 2012, doi: 10.1016/j.catena.2012.04.001.
- [57] M. Lee, J. Kang, and S. Jeon, “APPLICATION OF FREQUENCY RATIO MODEL AND VALIDATION FOR PREDICTIVE Korea Adaptation Center for Climate Change , Korea Environment Institute , 613-2 Bulgwang-Dong , Email : leemj@korea.kr,” *Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS), 2012 IEEE Int. IEEE, 2012.*, no. 1, pp. 895–898, 2012.
- [58] Z. S. Pourtaghi and H. R. Pourghasemi, “GIS-based groundwater spring potential assessment and mapping in the Birjand Township, southern Khorasan Province, Iran,” *Hydrogeol. J.*, vol. 22, no. 3, pp. 643–662, 2014, doi: 10.1007/s10040-013-1089-6.
- [59] O. Rahmati, H. R. Pourghasemi, and H. Zeinivand, “Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran,” *Geocarto Int.*, vol. 31, no. 1, pp. 42–70, 2016, doi: 10.1080/10106049.2015.1041559.