

# PRIMENA AHP I WoE METODE U PROCENI PODLOŽNOSTI TERENA NA KLIŽENJE ZA PODRUČJE OPŠTINE KRUPANJ

## APPLICATION OF AHP AND WoE METHODS FOR LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY ASSESSMENT ON KRUPANJ MUNICIPALITY

UDK: 551.435.62(497.11)

Originalni naučni rad

V. prof. dr Biljana ABOLMASOV, dipl. inž. geolog.<sup>1)</sup>

Jelka KRUŠIĆ, student doktorskih studija<sup>2)</sup>

Katarina ANDREJEV, student doktorskih studija<sup>3)</sup>

Miloš MARJANOVIĆ, dipl. inž. geolog.<sup>4)</sup>

Ranka STANKOVIĆ, dipl. matem.<sup>5)</sup>

Uroš ĐURIĆ, student doktorskih studija<sup>6)</sup>

### REZIME

U radu su prikazani rezultati dve metode procene podložnosti terena na kliženje: višekriterijumske AHP (Analytical Hierarchy Process) metode i metode uslovne verovatnoće, odnosno metode težine dokaza WoE (Weight of Evidence) primenjene na područje opštine Krupanj u zapadnoj Srbiji. Validacija dobijenih rezultata procene izvršena je za svaki dobijeni model poređenjem sa realnim podacima evidentiranih pojava nestabilnosti dobijenih terenskim kartiranjem i analizom satelitskih snimaka visoke rezolucije. Nakon toga izvršena je uporedna analiza dobijenih rezultata. Oba modela pokazuju zadovoljavajuću tačnost, gde je statistička metoda dala nešto preciznije rezultate. Rezultati procene podložnosti predstavljaju dobru osnovu za procenu relativnog rizika od procesa kliženja i podlogu za izradu planskih dokumenata opštine Krupanj.

**Ključne reči:** klizišta, AHP metoda, WoE metoda, karta podložnosti na kliženje

### SUMMARY

This paper is an example of landslide susceptibility assessment in Krupanj municipality in western Serbia, using two different multicriteria methods: Analytical Hierarchy Process (AHP) and Weight of Evidence (WoE). AHP is based on quantified expert judgement on the individual importance of conditioning factors, as geological, morphological and environmental proxies for landsliding. WoE is data-driven, i.e. it uses conditional probability of landslide occurrence to grade conditioning factors by their importance. Validation was performed by cross-referencing with an existing landslide inventory, which was made by field mapping and interpretation of satellite images. Both models have relatively good performance, but WoE has slightly better validation parameters. These results are a solid background for general overview of the landslide susceptibility distribution at municipality scale, and can be successfully used for further landslide risk assessment or large scale planning.

**Key words:** landslides, AHP method, WoE method, landslide susceptibility map

## 1. UVOD

Procene podložnosti, hazarda i rizika od klizišta i drugih pojava nestabilnosti [5], [13] predstavljaju deo procesa upravljanja rizikom, sa krajnjim ciljem da se umanjí verovatnoća potencijalnih ljudskih i materijalnih gubitaka. U publikaciji [25] prvi put su definisani hazard

i rizik od procesa kliženja i dugi niz godina predstavljali su polaznu osnovu u mnogim studijama, stručnim i naučnim radovima vezanim za pomenutu problematiku. Savremeni pristup procene hazarda i rizika od kliženja podrazumeva u terminološkom, teorijskom i praktičnom vidu niz jasno definisanih postupaka-metoda koje pre svega zavise od namene, veličine područja i zahtevane tačnosti procene [12], [3], [4]. Kao rezultat procene nastaju karte na kojima je prikazana prostorna distribucija klasa hazarda, odnosno rizika od procesa kliženja. U velikom broju primera u literaturi i praksi, za nivo srednje razmere, proceduru procene hazarda nije moguće sprovesti u potpunosti, te zadovoljavajuće rezultate daje i procena podložnosti terena na kliženje (*landslide suscep-*

Adresa autora: <sup>1,2,3,4 i 5)</sup> Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Đušina 7, 11000 Beograd

<sup>6)</sup> Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd

<sup>1)</sup> biljana.abolmasov@rgf.bg.ac.rs

<sup>2)</sup> jelka.krusic@rgf.bg.ac.rs

<sup>3)</sup> katarina.andrejev@rgf.bg.ac.rs

<sup>4)</sup> milos.marjanovic@rgf.bg.ac.rs

<sup>5)</sup> ranka.stankovic@rgf.bg.ac.rs

<sup>6)</sup> udjuric@grf.bg.ac.rs

tibility), koja za razliku od procene hazarda nema komponentu vremenske verovatnoće [1], [4], [9].

Teritorija opštine Krupanj je nakon obilnih padavina u aprilu i maju mesecu 2014. godine pretrpela najviše šteta od posledica izlivanja lokalnih vodotoka i klizišta u Srbiji [6]. U toku realizacije projekta BEWARE izvršena su terenska i kabinetska istraživanja (<http://geoliss.mre.gov.rs/beware/>). Terenskim kartiranjem registrovano je 160, dok je analizom satelitskih snimaka detektovano 507 različitih pojava nestabilnosti [7].

U radu su prikazani rezultati primene dve metode procene podložnosti terena na klizenje: višekriterijumske AHP (*Analytical Hierarchy Process*) metode i metode uslovne verovatnoće, odnosno metode težine dokaza WoE (*Weight of Evidence*). Na oba modela izvršena je provera tačnosti i uporedna analiza dobijenih rezultata. Rezultati procene podložnosti predstavljaju dobru osnovu za procenu relativnog rizika od procesa klizanja i podlogu za izradu planskih dokumenata opštine Krupanj. Naime, izrada planskih dokumenta (Zakon o rudarstvu i geološkim istraživanjima Sl.glasnik RS 101/2015) za nivo prostornih planova opština podrazumeva pored inženjerskogeoloških podloga i procenu ugroženosti područja prirodnim hazardima. Dalje, za nivo urbanističkih podloga, ova procesom klizanja potencijalno ugrožena područja, predstavljaju zone na kojima je potrebno posebno definisati uslove izgradnje objekata, što je u domenu detaljnih geotehničkih istraživanja terena.

## 2. METODE PROCENE

### 2.1. AHP – analitički hijerarhijski postupak

Analitički hijerarhijski postupak (AHP) je metoda koja omogućava kvantifikaciju ekspertske procene u višekriterijumskoj analizi. Prema AHP metodi definiše se značaj skupa kriterijuma [24], što u primeni metode za procenu podložnosti na klizenje znači da treba da se odredi odnos uticaja uzročnih parametara [14], [15], [17], [26]. Cilj je da se definiše prostorna raspodela usvojenih težinskih vrednosti ( $w_i$ ) pojedinačnih parametara ( $M_i$ ), gde svaka vrednost ukazuje na to koliki je uticaj pojedinačnog parametra. Suma težinskih vrednosti svih parametara jednaka je 1, odnosno 100% (jednačina 1).

$$\sum_{i=1}^n w_i M_i = M_{AHP} \quad (1)$$

Dodeljivanje težinskih vrednosti pojedinim parametrima je dvostepen postupak. Kao prvo, procedura zahteva ukupnu procenu relativnog značaja svakog parametra u odnosu na druge i definisana je ekspertskom procenom. Ukoliko je  $n$  broj uzročnika procesa klizanja, ukupan broj poređenja između faktora je  $n \cdot (n-1)/2$ , što čini ovu proceduru pogodnom kada je broj faktora do 10. Uporedna skala ima vrednosti od 1 do 9, gde 1 označava jednak uticaj, a 9 naglašeno veći uticaj pojedinog parametra. Nakon toga, kreira se matrica procene u kojoj se određuje međusobni odnos uticajnih parametara, pri čemu se formira matrica koja je inverzno simetrična ( $a_{ij} \cdot a_{ji} = 1$ ) u

odnosu na glavnu dijagonalu. Zatim se vrši normalizacija matrice, odnosno svaki član matrice se deli sumom elemenata kolone kojoj pripada. U nastavku postupka preostaje računanje srednje vrednosti za redove matrice kako bi se dobile krajnje težinske vrednosti. Matrica treba da zadovolji kriterijum konzistentnosti, odnosno mora imati logičnu hijerarhiju relativnih vrednosti uticajnih parametara. Prema usvojenim kriterijumima [24], toleriše se odstupanje do 10%, odnosno potrebno je izvršiti proveru konzistentnosti matrice, izračunavanjem indeksa konzistentnosti ( $CR$ ). Ukoliko je indeks konzistentnosti  $CR > 0.1$ , neophodno je korigovati model i ponoviti proceduru.

### 2.2. WoE – metoda uslovne verovatnoće

Metoda WoE (*Weight of Evidence*) je jedna od metoda uslovne verovatnoće [2], koja koristi logaritamsko-linearnu formu Bajesovog modela verovatnoće da bi se procenio uticaj uzročnih parametara u proceni podložnosti na klizenje [19], [21], [22], [23].

U Bajesovom pristupu najvažniji koncept čine “ranije”-bezuslovne verovatnoće (*PriorP-prior probabilities*) i “kasnije”-uslovne verovatnoće (*PostP-posterior probabilities*). *PriorP* je definisana kao postojeće empirijsko znanje o uslovima pod kojima se desio neki događaj u prošlosti. Ova inicijalna verovatnoća se može modifikovati uvođenjem drugih “dokaza”, tj. uticajnih parametara koji uslovljavaju verovatnoću glavne promenljive (*PriorP*). *PostP* se zatim određuje na osnovu gustine glavne promenljive (u ovom slučaju pojava klizišta) u svakoj klasi nekog uzročnog faktora, a predstavlja verovatnoću da će se neki događaj desiti usled prisustva tog parametra. Kod primene ove metode, za procenu podložnosti na klizenje, konačni model se zasniva na računanju pozitivnih  $p_{ij}$  i negativnih  $q_{ij}$  “dokaza”, a na osnovu njihovih težinskih faktora.

Težina dokaza (*Weight of Evidence*) –  $w_{ij}$  se računa na sledeći način (jednačina 2):

$$W_{ij} = \ln \left( \frac{p_{ij}}{q_{ij}} \right) \quad (2)$$

gde je:

$p_{ij}$  – broj pozitivnih “dokaza” za klasu  $j$ ,  $i$ -tog parametra, podeljen ukupnim brojem pozitivnih “dokaza” za parametar  $i$

$q_{ij}$  – broj negativnih “dokaza” za klasu  $j$ ,  $i$ -tog parametra, podeljen ukupnim brojem negativnih “dokaza” za parametar  $i$

## 3. PRIMENA AHP I WoE METODA PROCENE NA PODRUČJE OPŠTINE KRUPANJ

### 3.1. Opšti podaci o istražnom području

Teritorija opštine Krupanj zauzima površinu od 342 km<sup>2</sup> i nalazi se u mačvanskom okrugu u zapadnoj Srbiji. Krupanj ima ukupno 23 naselja i 17.295 stanovnika i smešten je u dolinama reka Čadavice, Bogoštice i Kržave čijim spajanjem nastaje reka Likodra [6]. U mor-

fološkom pogledu, predstavlja brdsko-planinski teren sa nadmorskim visinama od 230-973m. Područje opštine se karakteriše umereno kontinentalnom klimom sa elementima subplaninske klime u višim predelima. Prosečna godišnja količina padavina iznosi 770mm za referentni period 1981-2010.

Istražno područje se odlikuje složenom geološkom građom u kojoj preovlađuju niskokristalasti škriljci paleozojske starosti, jadarskog razvića [10], [16], [20]. Meta-peščari, škriljci, podređeno argilošisti i filiti pripadaju neraščlanjenom devonu i karbonu (D,C). Sedimenti i metamorfiti karbonske starosti predstavljeni su srednjim karbonom ( $C_2$ ) u okviru kojih su izdvojeni krečnjaci i argilofoliti namirskog kata, kao i krečnjaci, glineni škriljci, ređe kvarcni peščari baškirkog kata. Sedimenti permske starosti imaju malo rasprostranjenje na istražnom području. Razlikuju se dva superpoziciona paketa: srednji perm ( $P_2$ ) predstavljen terigenim sedimentima – kvarcnim peščarima i peskovito – glinovitim škriljcima i mlađim ( $P_3$ ) predstavljenim slojevitim krečnjacima, glincima i peščarima. Sedimenti mezozoika su predstavljeni donjotrijaskim slojevitim ( $T_1$ ) i bankovitim krečnjacima, peščarima i glinenim škriljcima. Sedimenti kredne starosti ( $K_2$ ) predstavljeni su masivnim krečnjacima turona. Sedimenti kvartarne starosti su zastupljeni u dolinama Bogoštice, Kržave, Čađavice i Likodre i predstavljeni su aluvijalnim sedimentima (al), šljunkovima i peskovima.

### 3.2. Ulazni podaci

U oba korišćena postupka, kako AHP tako i WoE, analizirani su i vrednovani takozvani stacionarni parametri, koji se suštinski bitno ne menjaju tokom vremena i predstavljaju uzročnike procesa kliženja (*conditioning factors*). U skladu sa tim, izdvojeno je osam uticajnih parametara: litološki sastav, nagib terena, visina reljefa, orijentacija padina, udaljenost od granica promene hidrogeološke funkcije stenskih masa, udaljenost od lokalnih vodotoka, namena i korišćenje zemljišta i erodibilnost tla. Izdvajanje klasa za svaki parametar je statistički određeno na osnovu broja klizišta unutar svake klase, za svaki pojedinačni parametar [26]. Time se klase koje imaju najveći broj klizišta smatraju najnepovoljnijim i obratno. Prilikom analize i procene, odnos uticajnih parametara nije posebno izdvajan prema određenom mehanizmu kretanja (tečenje, kliženje).

Sve oleate prostorne distribucije uticajnih parametara/klasa su pripremljene u raster formatu u GIS okruženju u istoj 30x30m rezoluciji i korišćene su za obe metode procene. Postupak vrednovanja pojedinačnih parametara i izrada oleata koje su kasnije korišćene za procenu podložnosti na kliženje dat je ukratko u narednom tekstu, dok su u Tabeli 1 sumarno prikazani ulazni podaci i vrednosti parametara unutar pojedinih klasa.

Oleata litološkog sastava (*parametar  $M_1$* ) je urađena na osnovu osnovne geološke karte i na osnovu analize sveukupnih karakteristika izdvojenih jedinica (litoloških kompleksa) u pogledu podložnosti na kliženje [10], [16], [20]. Na istražnom području preovlađuju niskokristalasti škriljci sa debelom zonom površinskog raspadanja u ko-

jima je i aktiviran najveći broj klizišta [6], (te su time dobili najveći težinski faktor), zatim su zastupljeni flišoliki sedimenti, graniti i granodioriti (kojima je pridodat manji težinski faktor), dok su aluvijalne naslage bez uticaja.

Oleata nagiba terena (*parametar  $M_2$* ) izvedena je iz digitalnog elevacionog modela terena (DTM) gde je usvojeno da su područja terena koja imaju nagib 10-20° ocenjena kao najnepovoljnija, s obzirom da je statistički najveći broj pojava nestabilnosti registrovan u tom rasponu prirodnog nagiba padina. Izdvojeno je šest klasa nagiba terena (Tabela 1).

Oleata udaljenosti od lokalnih vodotoka (*parametar  $M_3$* ) je urađena uzimajući u obzir da je uz lokalne vodotoke registrovan najveći broj pojava nestabilnosti. Usvojeno je da se vrednost težinskog faktora smanjuje sa udaljenošću od lokalnih vodotoka, te je izdvojeno pet različitih klasa.

Oleata nadmorskih visina (*parametar  $M_4$* ) predstavljena je klasama nadmorske visine reljefa gde je na osnovu prostorne distribucije pojava klizišta izdvojeno pet klasa zavisno od zastupljenosti pojava u određenim klasama visine reljefa i izvedena je iz DEM terena.

Udaljenost od granica promene hidrogeološke funkcije stenskih masa (*parametar  $M_5$* ) je parametar koji je uveden da bi se potencirao odnos promene hidrogeoloških funkcija stenskih masa i njihovog uticaja na proces kliženja. Usvojeno je da su zone u blizini granice promene hidrogeoloških funkcija stenskih masa, više podložne na kliženje, što je tokom terenskih istraživanja potvrđeno. Na taj način je na oleati izdvojeno pet klasa.

Oleata korišćenja zemljišta (*parametar  $M_6$* ) je formirana obradom podataka *Corine Land Cover 2012*, gde je na osnovu rasporeda gustine vegetacionog pokrivača, odnosno sveukupne namene zemljišta izvršena procena podložnosti terena u odnosu na ovaj parametar. Međutim, na području Krupnja ovom parametru nije dat veći značaj, jer se na terenu pokazalo da je veliki broj klizišta aktiviran u područjima sa bogatim šumskim pokrivačem. Za ovaj parametar izdvojene su četiri klase.

Oleata erodibilnosti tla (*parametar  $M_7$* ) je urađena na osnovu metode Gavrilovića [11] kao i na osnovu terenskih observacija. Izdvojeno je pet klasa erodibilnosti shodno metodologiji [11].

Oleata orijentacije padina (*parametar  $M_8$* ) je urađena uz pretpostavku da se padine orijentisane od severozapada ka jugoistoku težinski vrednuju kao najnepovoljnije, dok se južne, jugozapadne i zapadne vrednuju kao najpovoljnije [26], zbog različitog stepena osunčanosti, a time i različitih podložnosti ka fizičko-mehaničkom raspadanju, odnosno zadržavanju vode u tlu. Izdvojeno je takođe pet klasa.

## 4. REZULTATI I DISKUSIJA

Na osnovu usvojene metodologije, primenjena su AHP i WoE metode procene podložnosti na kliženje za područje opštine Krupanj.

U AHP modelu procene podložnosti terena na kliženje formirana je AHP matrica vrednosti pojedinačnih parametara (Tabela 2). Odnos značaja između pojedinih

Tabela 1. Prikaz vrednovanja pojedinačnih parametara i njihovih klasa

| Ulazni parametri  | Klase/opis  |   |                        |  |   |        |
|---|---|---|------------------------|--|---|--------|
|   | 1   | 2   | 3                      | 4  | 5   |        |
| Litološki sastav (M1)   | Jezerski sedimenti, klastični sedimenti, peskovito-karbonatne stene, piroklastiti | Krečnjaci, dolomiti, krečnjaci sa rožnacima | Graniti i granodioriti | Fliš i flišni kompleks (laporci, glinci, peščari, alevroliti)  | Niskokristalaste metamorfne stene (argilošisti, sericitski škriljci, metapeščari) |        |
| Nagib terena (M2)   | 1   | 2   | 3                      | 4  | 5   | 6      |
|   | 0 – 5 °   | 5 – 10°                                     | 10 – 15 °              | 15 – 20°   | 20 – 30°  | > 30 ° |
| Udaljenost od lokalnih vodotoka (m) (M3)                                    | 1   | 2   | 3                      | 4  | 5   |        |
|   | 1 – 140   | 140 – 310                                   | 310 – 500              | 500 – 740  | > 740   |        |
| Visina reljefa (m.n.v) (M4)   | 1   | 2   | 3                      | 4  | 5   |        |
|   | 145 – 275   | 275 – 370                                   | 370 – 450              | 450 – 600  | > 600   |        |
| Udaljenost od granica promene hidrogeološke funkcije stenskih masa (m) (M5) | 1   | 2   | 3                      | 4  | 5   |        |
|   | 0 – 150   | 150 – 370                                   | 370 – 730              | 730 – 1300   | > 1300  |        |
| Korišćenje zemljišta (M6)   | 1   | 2   | 3                      | 4  |   |        |
|   | Livade, mešovite šume, prelaz između šumovitog i žbunastog rastinja               | Urbana područja                             | Listopadne šume        | Poljoprivredna zemljišta, pašnjaci, oranice koje se navodnjavaju, kompleksi različitih biljnih kultura |   |        |
| Erodibilnost tla (M7)   | 1   | 2   | 3                      | 4  | 5   |        |
|   | Veoma niska   | Niska                                       | Srednja                | Visoka   | Veoma visoka  |        |
| Orijentacija padina (M8)  | 1   | 2   | 3                      | 4  | 5   |        |
|   | 1 – 60°   | 60 – 125 °                                  | 125 – 200 °            | 200 – 285 °  | 285 – 360 °   |        |

Tabela 2. AHP matrica težinskih vrednosti pojedinačnih parametara

| AHP            | M <sub>1</sub> | M <sub>2</sub> | M <sub>3</sub> | M <sub>4</sub> | M <sub>5</sub> | M <sub>6</sub> | M <sub>7</sub> | M <sub>8</sub> |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| M <sub>1</sub> | 1,00           | 1,00           | 2,00           | 2,00           | 4,00           | 6,00           | 8,00           | 9,00           |
| M <sub>2</sub> | 1,00           | 1,00           | 1,00           | 2,00           | 3,00           | 4,00           | 7,00           | 8,00           |
| M <sub>3</sub> | 0,50           | 1,00           | 1,00           | 2,00           | 3,00           | 5,00           | 6,00           | 7,00           |
| M <sub>4</sub> | 0,50           | 0,50           | 0,50           | 1,00           | 2,00           | 4,00           | 5,00           | 7,00           |
| M <sub>5</sub> | 0,25           | 0,33           | 0,33           | 0,50           | 1,00           | 2,00           | 4,00           | 6,00           |
| M <sub>6</sub> | 0,17           | 0,25           | 0,20           | 0,25           | 0,50           | 1,00           | 3,00           | 5,00           |
| M <sub>7</sub> | 0,13           | 0,14           | 0,17           | 0,20           | 0,25           | 0,33           | 1,00           | 3,00           |
| M <sub>8</sub> | 0,11           | 0,13           | 0,14           | 0,14           | 0,17           | 0,20           | 0,33           | 1,00           |
| Σ              | 3,65           | 4,35           | 5,34           | 8,09           | 13,92          | 22,53          | 34,33          | 46,00          |

Tabela 3. AHP matrica težinskih odnosa uticajnih parametara

| AHP            | M <sub>1</sub> | M <sub>2</sub> | M <sub>3</sub> | M <sub>4</sub> | M <sub>5</sub> | M <sub>6</sub> | M <sub>7</sub> | M <sub>8</sub> | %    |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|
| M <sub>1</sub> | 0,27           | 0,23           | 0,37           | 0,25           | 0,29           | 0,27           | 0,23           | 0,20           | 0,26 |
| M <sub>2</sub> | 0,27           | 0,23           | 0,19           | 0,25           | 0,22           | 0,18           | 0,20           | 0,17           | 0,21 |
| M <sub>3</sub> | 0,14           | 0,23           | 0,19           | 0,25           | 0,22           | 0,22           | 0,17           | 0,15           | 0,20 |
| M <sub>4</sub> | 0,14           | 0,11           | 0,09           | 0,12           | 0,14           | 0,18           | 0,15           | 0,15           | 0,14 |
| M <sub>5</sub> | 0,07           | 0,08           | 0,06           | 0,06           | 0,07           | 0,09           | 0,12           | 0,13           | 0,08 |
| M <sub>6</sub> | 0,05           | 0,06           | 0,04           | 0,03           | 0,04           | 0,04           | 0,09           | 0,11           | 0,06 |
| M <sub>7</sub> | 0,03           | 0,03           | 0,03           | 0,02           | 0,02           | 0,01           | 0,03           | 0,07           | 0,03 |
| M <sub>8</sub> | 0,03           | 0,03           | 0,03           | 0,02           | 0,01           | 0,01           | 0,01           | 0,02           | 0,02 |
| Σ              | 1,00           | 1,00           | 1,00           | 1,00           | 1,00           | 1,00           | 1,00           | 1,00           | 1,00 |

parametara (Tabela 3) vrednovan je po jednačini (3):

$$M = 0.26 * M_1 + 0.21 * M_2 + 0.20 * M_3 + 0.14 * M_4 + 0.08 * M_5 + 0.06 * M_6 + 0.03 * M_7 + 0.02 * M_8 \quad (3)$$

gde su: M<sub>1</sub>– litološki sastav; M<sub>2</sub>– nagib terena; M<sub>3</sub>– udaljenost od lokalnih vodotoka; M<sub>4</sub>– visina terena; M<sub>5</sub>– udaljenost od geoloških granica stena sa različitim hidrogeološkom funkcijom; M<sub>6</sub>– korišćenje zemljišta; M<sub>7</sub>– erodibilnost tla i M<sub>8</sub>– orijentacija padina.

Proverom konzistencije dobijenog AHP modela utvrđeno je da je model konzistentan jer je  $\lambda_{max} = 8,4455$ , odnosno  $n=8$ , tj. indeks konzistentnosti je  $CR=0,045$ .

Postupak procene WoE metodom je prikazan je u primeru (Tabela 4) za dva uticajna parametara (zbog veličine tabele). Nakon što je svaki uticajni parametar ponaosob “preklo-

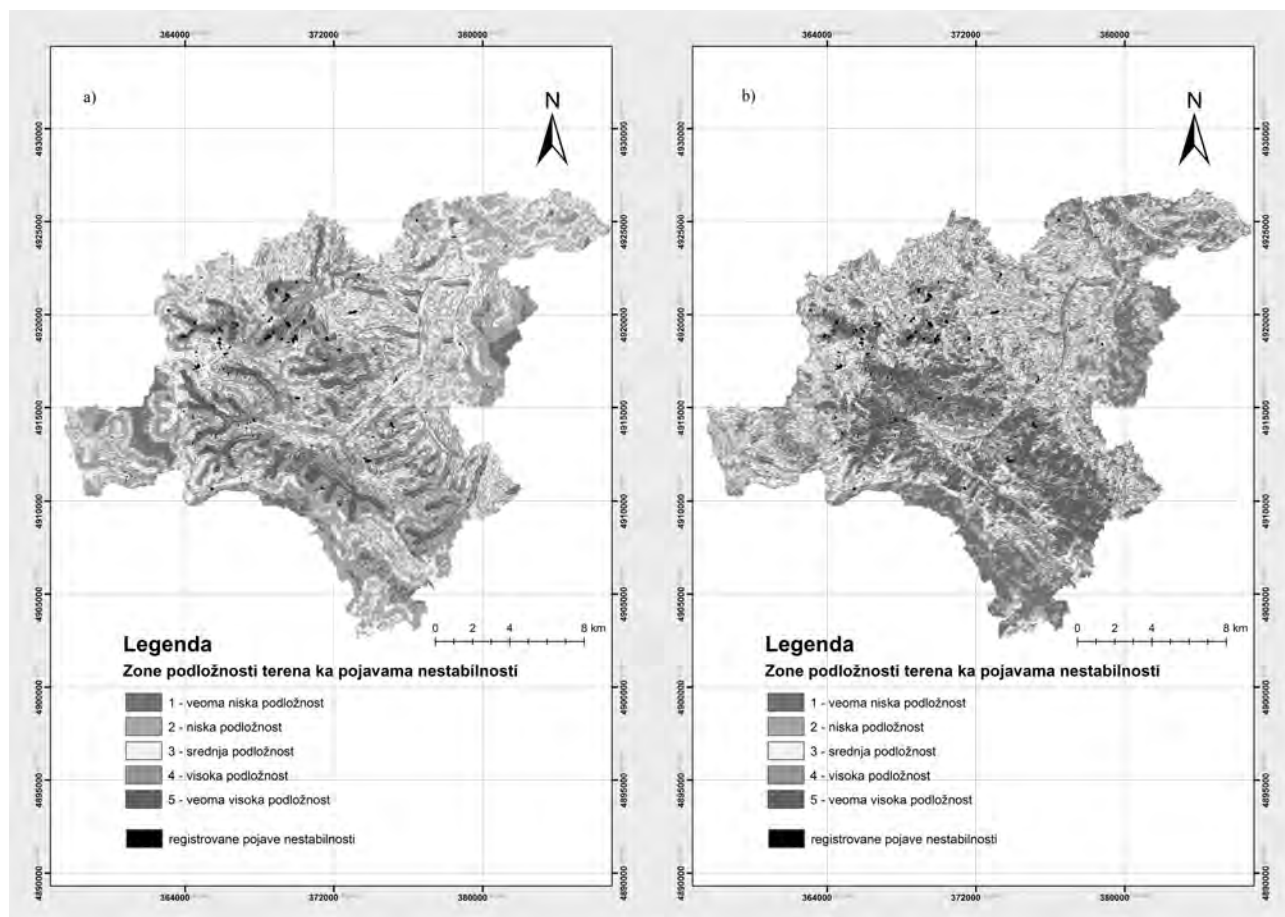


Tabela 4. Rezultati procene dobijeni primenom WoE metode-primer klasifikacije za parametare: nagib terena i litološki sastav

| Ulazni modeli    | Opis klasa   | $W^+ = \frac{\ln\{C \cap F_i\}}{\{-C \cap F_i\}}$ | $W^- = \frac{\ln\{C \cap \neg F_i\}}{\{-C \cap \neg F_i\}}$ | $\Sigma W_i = W_i^+ + W_i^-$ | Nove klase |
|------------------|--|---|---|------------------------------|------------|
| Nagib terena     | 0 – 5 °  | 0.00238   | -0.00784  | -0.00545                     | 0          |
|                  | 5 – 10 °   | 0.00452   | -0.00806  | -0.00354                     | 20         |
|                  | 10 – 15 °  | 0.00733   | -0.00728  | 0.00004                      | 57         |
|                  | 15 – 20 °  | 0.01055   | -0.00643  | 0.00413                      | 100        |
|                  | 20 – 30 °  | 0.01004   | -0.00672  | 0.00332                      | 92         |
|                  | > 30 °   | 0.00488   | -0.00737  | -0.00249                     | 31         |
| Litološki sastav | jezerski sedimenti, klastični sediment, piroklastiti, peskovito-karbonatne stene | 0.00071   | -0.00771  | -0.00700                     | 0          |
|                  | krečnjaci, dolomiti, krečnjaci s rožnacijama                                     | 0.00219   | -0.00831  | -0.00612                     | 6          |
|                  | graniti i granodioriti   | 0.00662   | -0.00735  | -0.00074                     | 45         |
|                  | fliš i flišni kompleks   | 0.00415   | -0.00781  | -0.00366                     | 24         |
|                  | nisko kristalaste metamorfne stene   | 0.01045   | -0.00342  | 0.00703                      | 100        |

pljen” sa registrovanim pojavama, dobijen je broj piksela u kojima su prisutne pojave klizišta, odnosno broj piksela u kojima nema pojava klizišta u okviru svake klase svakog pojedinačnog parametra. Na osnovu toga za svaku klasu svakog uticajnog parametra sračunati su pozitivni  $W^+$ , odnosno negativni težinski faktor  $W^-$ . Te dve vred-

nosti su sabrane, a normalizacijom ove sume, dobijene su nove klase modela uticajnih parametara. Primenom ove statističke metode, novodobijene klase veće podložnosti terena na klizištenje terena odgovaraju područjima gde je veća vrednost piksela i obrnuto.



Slika 1. Finalni modeli podložnosti na klizištenje terena a) AHP metoda, b) WoE metoda

Tabela 5. Rezultati validacije dobijenih modela podložnosti na kliženje

| Parametar                    | Formula                  | AHP      | WoE      |
|------------------------------|--------------------------|----------|----------|
| Osetljivost                  | $TPR=TP/P=TP/(TP + FN)$  | 0,718727 | 0,706291 |
| Specifičnost                 | $SPC=TN/N=TN/(FP + TN)$  | 0,556080 | 0,606018 |
| Stopa lažno pozitivnih (FPR) | $FPR=FP/N=FP/(FP + TN)$  | 0,443919 | 0,393981 |
| Stopa lažno negativnih (FNR) | $FNR=FN/P =FN/(TP + FN)$ | 0,281272 | 0,293708 |
| Tačnost                      | $ACC=(TP + TN)/(P + N)$  | 0,557258 | 0,606744 |

Gde su: True Positives (TP) su slučajevi kada dobijeni model prikazuje pojave klizišta tamo gde su one registrovane; True Negatives (TN) predstavlja broj piksela koji ni u modelu ni na terenu nemaju registrovane pojave klizišta; False Positives (FP) predstavljaju broj piksela sa visokom podložnosti ka kliženju tamo gde na terenu nisu registrovana klizišta; False Negatives (FN) su slučajevi kada su klizišta registrovana dok je u modelu klasa male podložnosti ka kliženju,  $P=TP + FN$ ,  $N=FP + TN$

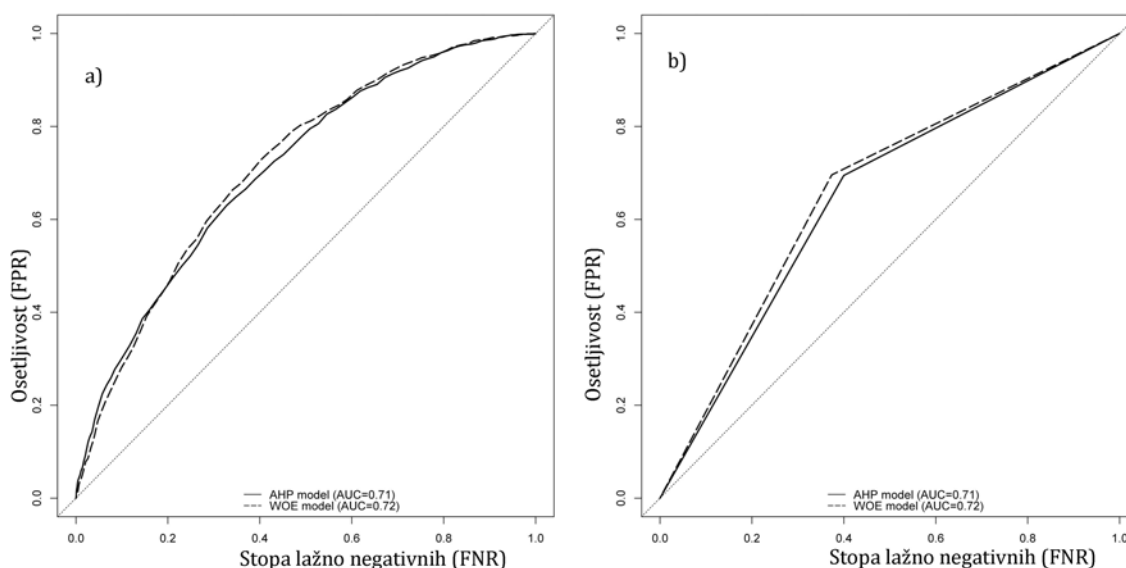
Primena AHP i WoE metode u proceni podložnosti na kliženje terena kao krajnji rezultat daje kartu prostorne distribuciju podložnosti na kliženje u srednjoj razmeri 1:25 000, na kojoj su izdvojene klase različitog stepena podložnosti (slika 1). Obe metode se mogu primeniti i na sitnijim i na krupnijim razmerama uz odgovarajući nivo detaljnosti ulaznih podataka.

Validacija rezultata je izvršena tako što je vršena provera dobijenih modela podložnosti na kliženje sa realnim podacima registrovanih pojava klizišta prikupljenih terenskim kartiranjem i analizom satelitskih snimaka veoma visoke rezolucije (Pleiades) [18]. Pri validaciji je primenjena matrica kontigencije (Confusion Matrix ili Contingency Table), koja ukazuje na različite tipove grešaka dobijenih modela u odnosu na realno stanje. Rezultati validacije modela podložnosti na kliženje dobijenih primenom AHP i WoE metoda dati su u Tabeli 5.

Model je ocenjen i na osnovu ROC krivih (Receiver Operating Characteristic), koje spadaju u najobjektivnije vidove ocene modela, kako kvantitativno na osnovu

vrednosti parametra Površine Ispod Krive AUC (Area Under Curve), tako i kvalitativno, na osnovu karaktera i oblika krive [8]. AHP i WoE modeli su probablističkog tipa, ali su kasnije reklasifikovani (diskretizovani) na 5 intervala podložnosti na kliženje (od vrlo niske do vrlo visoke), tako da je upoređivanje izvršeno i za probablističke i za diskretne verzije modela (slika 2). Diskretni modeli su upoređeni tako što su im klase visoke i vrlo visoke podložnosti na kliženje objedinjene u jednu klasu, a sve ostale klase pripadaju nultoj klasi (binarizacija modela). Generalno se može videti, da oba

modela, u obe verzije, imaju velikih sličnosti u smislu mogućnosti prognoze pojave klizišta. Naime, vrednosti AUC od oko 0,7 generalno svrstavaju ove modele u one koji dobro predviđaju, a simetričan karakter njihovih krivih sugerise da je odnos između TP i FP izbalansiran, tako da se ne radi niti o konzervativnim niti o suviše optimističnim modelima. Međusobnim upoređivanjem se ne može dati prednost jednom od modela jer su vrlo slični, a na osnovu vrednosti AUC se može reći da je njihova upotrebna vrednost ograničena na generalnu primenu u srednjoj razmeri (1:25000), jer se za manja područja i krupniju razmeru očekuje da se proces kliženja prognozira sa većom preciznošću. Generalno, krupnija razmera podrazumeva i detaljna geotehnička istraživanja pojedinačnih pojava, te time i dobijanje relevantnih kvantitativnih podataka za primenu drugih modela procene hazarda od kliženja, tzv. determinističkih ili probablističkih [3].



Slika 2. Uporedni grafici ROC-krivih za AHP i WoE modele: (a) probablističke verzije modela, (b) diskretne verzije modela. Puna linija označava ROC krivu za AHP model, isprekidana linija ROC krivu za WoE model

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana primena različitih metoda procene podločnosti terena na klizište terena na primeru teritorije opštine Krupanj sa ciljem dobijanja što preciznijeg i realnijeg modela. Prva primenjena metoda je ekspertska – AHP (*Analytical Hierarchy Process*), a druga statistička, tj. metoda težine dokaza WoE (*Weight of Evidence*). U oba postupka analizirano je osam uticajnih-uzročnih parametara: litološki sastav, nagib terena, visina reljefa, orijentacija padina, udaljenost od granica promene hidrogeološke funkcije stenskih masa, udaljenost od lokalnih vodotoka, namena i korišćenje zemljišta i erodibilnost tla.

Ocena dobijenih modela je izvršena na osnovu ROC krivih i pokazala je da oba modela imaju dobru mogućnost prognoziranja pojava klizišta sa vrednošću AUC od 0,7. U poređnom analizom dobijenih modela zaključuje se da modeli pokazuju približne rezultate po pitanju tačnosti, sa neznatno boljim rezultatima koje je dala WoE metoda. Samo poređenje metoda nije dalo prostora za uočavanje suštinskih i značajnih razlika, jer su obe metode dale realne rezultate za nivo srednje razmere.

Rezultati procene su tek prvi korak u proceni hazarda od klizišta, a dalji doprinos bi trebalo da bude usmeren na prikupljanje i analizu vremenske verovatnoće, što za krajnji cilj ima procenu kvantitativnu hazarda i rizika od procesa klizišta.

Primenljivost ovakvih modela je najveća u oblasti planiranja (prostornog i urbanističkog), kao i u ranim fazama projektovanja pojedinih infrastrukturnih objekata (putevi, pruge, cevovodi), kada su potrebne brze procene ugroženosti objekata na osnovu malog broja dostupnih podataka. Za druge nivoe projektovanja preporučuju se deterministički modeli koji zahtevaju detaljna geotehnička istraživanja terena.

### Zahvalnica

Rad je nastao kao rezultat projekta BEWARE (No 00094641) finansiranog od Vlade Japana, uz koordinaciju UNDP kancelarije u Srbiji. Projekat je podržan od strane Kancelarije za pomoć i obnovu poplavljenih područja i Ministarstva za rudarstvo i energetiku Republike Srbije, a realizovan od strane Geološkog zavoda Republike Srbije i Rudarsko-geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Rezultati istraživanja su deo istraživanja u okviru projekta TR36009 finansiranog od Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

### LITERATURA

- [1] Abolmasov B. Hazard i upravljanje rizikom od klizišta. Geološki glasnik 33-nova serija 1, pp.173-189, 2012.
- [2] Bonham-Carter GF. Geographic Information System for Geoscientists: Modelling with GIS. Pergamon Press, Oxford. 398 pp, 1994.
- [3] Cascini L. Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales, Engineering Geology 102, pp.164-177, 2008.

- [4] Corominas J. et al. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk, Bull Eng Geol Environ, 73, pp.209-263, 2014.
- [5] Cruden DM, Varnes DJ. Landslide types and processes. In: Turner AK, Schuster RL (Eds) Landslide investigation and mitigation, Special Report 247, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C. 1996, Chapter 3, pp 36-75, 1996.
- [6] Đokanović S. Klizišta i štete nastale na objektima kao posledica intenzivnih padavina u opštini Krupanj. Časopis Tehnika1/2016, pp.48-55, 2016.
- [7] Đurić D, Mladenović A, Georgiades Pešić M, Marjanović M, Abolmasov B. Using multiresolution and multitemporal satellite data for post-disaster landslides inventory of the Republic of Serbia. Landslides, in press, DOI:10.1007/s10346-017-0847-2.
- [8] Fawcett T. An introduction to ROC analysis, Pattern Recognition Letters, Vol 27, pp. 861-874, 2006.
- [9] Fell R. et al. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning, Engineering Geology 102, pp.85-98, 2008.
- [10] Filipović I, Veselinović M, Rajčević D, Bodić D, Petronijević S, Rakić M, Gagić D, Milićević M. OGK 1:100 000, List Vladimirci, Zavod za geološka i geofizička ispitivanja, Beograd, 1967.
- [11] Gavrilović S. Inženjering o bujičnim tokovima i eroziji, Institut za eroziju, melioracije i vodoprivredu bujičnih tokova, Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet i Časopis Izgradnja – specijalno izdanje, 1971.
- [12] Guzzetti F, Carrara A, Cardinali M, Reichenbach P. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. Geomorphology 31, pp.181-216, 1999.
- [13] Hungr O, Leroueil S, Picarelli L. Varnes classification of landslides types, an update. Proceedings of the 11th International and 2nd American Symposium on Landslides and Engineered Slopes, Banff, Canada, 3-8 June, 2012. Eds, Eberhardt E, Froese C, Turner K, Leroueil S, Taylor&Francis Group, London, Vol 1, pp. 47-58, 2012.
- [14] Kayastha P, Dhital MR, De Smedt F. Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal. Computers&Geosciences 52, pp.398-408, 2013.
- [15] Komac M. A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. Geomorphology 74, pp.17-28, 2006.
- [16] Kubat I, Mojsilović S, Veljković D, Reljić D, Strajin D, Begić F, Dimitrov P. OGK 1:100 000, List Ljubovija. Geoinženjering, Sarajevo 1968.
- [17] Marjanović M, Abolmasov B, Đurić U, Zečević S. Impact of geoenvironmental factors on landslide susceptibility using an AHP method: A case study of

- Fruška Gora Mt., Serbia. *Annales Geologiques de la Peninsule Balkanique* 74, pp. 91-100, 2013.
- [18] Marjanović M, Vulović N, Đurić U, Božanić B. Coupling field and satellite data for an event-based landslide inventory. *Proceedings of the 12th International Symposium on Landslides, Naples, Italy, 12-19 June 2016*, pp. 1361–1366, 2016.
- [19] Mohammady M, Pourghasemi HR, Pradhan B. Landslide susceptibility mapping at Golestan Province, Iran: A comparison between frequency ratio, Dempster-Shafer, and weights-of-evidence models. *Journal of Asian Earth Sciences* 61, pp.221-236, 2012.
- [20] Mojsilović S, Filipović I, Rodin V, Navala M, Baklačić D, Đoković I, Jovanović Č, Živanović D, Eremija M, Cvetković B. *OGK 1:100 000, List Zvornik, Savezni Geološki Zavod, Beograd, 1975.*
- [21] Neuhäuser B, Terhorst B. Landslide susceptibility assessment using “weights-of-evidence” applied to study area at the Jurassic escarpment (SW Germany). *Geomorphology* 86, pp.12-24, 2007.
- [22] Ozdemir A, Altural T. A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences* 64, pp.180-197, 2013.
- [23] Regmi NR, Giardino JR, Vitek JD. Modeling susceptibility to landslides using weight of evidence approach: Western Colorado, USA. *Geomorphology* 115, pp.172-187, 2010.
- [24] Saaty TL. *The Analytical Hierarchy Process*. McGraw Hill, New York. 1980.
- [25] Varnes DJ. *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*, The UNESCO Press, Paris, 63 p., 1984.
- [26] Zhang G, Cai Y, Zheng Z, Zhen J, Liu Y, Huang K. Integration of the Statistical Index Method and the Analytic Hierarchy Process technique for the assessment of landslide susceptibility in Huizhou, China. *Catena* 142, pp. 233-244, 2016.