

Model rasplinute evaluacije kvaliteta softverskog sistema zasnovan na fuzzy logici

Marko M. Živanović, saradnik van radnog odnosa
Fakultet informacionih tehnologija,
Univerzitet Metropolitan
Beograd, Republika Srbija
marko.zivanovic@metropolitan.ac.rs
ORCID: 0009-0005-9264-3314

Olga Ristić, vanredni profesor
Fakultet Tehničkih nauka u Čačku,
Univerzitet u Kragujevcu
Čačak, Republika Srbija
olga.ristic@ftn.kg.ac.rs
ORCID: 0000-0002-1723-0940

Abstract— U ovom radu predstavljena je metodologija za evaluaciju kvaliteta veb sajtova akademskih i državnih institucija iz svih šest republika bivše SFRJ korišćenjem alata iz oblasti veštačke inteligencije, konkretno fuzzy logike. Razvijen je sistem za automatsku procenu performansi sajtova na osnovu tri ključna parametra: vreme učitavanja stranice, veličina stranice i broj HTTP zahteva. Na osnovu ovih ulaznih vrednosti, fuzzy kontrolni sistem generiše ocenu kvaliteta sajta na skali od 0 do 10, uz proces defazifikacije. U evaluaciju su uključeni sajтови univerziteta, ministarstava, naučnih instituta i agencija, čime se pruža sveobuhvatan uvid u tehnički kvalitet javno dostupnih digitalnih resursa u regionu. Pored numeričke ocene, sistem omogućava i vizualizaciju pripadnosti ulaznih vrednosti fuzzy skupovima, čime se dodatno objašnjavaju uticaji pojedinačnih faktora na ukupnu ocenu. Rezultati ukazuju na značajne razlike u tehničkoj optimizaciji analiziranih sajtova, čime se otvara prostor za buduća unapređenja u dizajnu i implementaciji veb prezentacija institucija od javnog značaja.

Ključne reči — fuzzy logika, evaluacija veb sajtova, veštačka inteligencija, tehnička optimizacija, državne institucije, akademske institucije, performanse sajta, defazifikacija, SEO, broj HTTP zahteva

I. UVOD

U eri digitalne transformacije, kvalitet veb sajtova akademskih i državnih institucija postaje ključan pokazatelj njihove transparentnosti i efikasnosti u komunikaciji s javnošću. Ovi sajтови predstavljaju primarni izvor informacija za građane i stručnu zajednicu, ali njihov tehnički kvalitet često varira, što utiče na korisničko iskustvo i percepciju institucije. U radu se predlaže metod za objektivnu evaluaciju tehničkih performansi veb sajtova, zasnovan na primeni fuzzy logike – pristupa koji je posebno pogodan kada su ulazni podaci neprecizni ili zavise od ljudskog rezonovanja. Evaluacija se sprovodi na uzorku sajtova iz svih šest republika bivše SFRJ, koristeći tri ključna parametra: vreme učitavanja stranice, veličina stranice i broj HTTP zahteva. Podaci se prikupljaju pomoću Python alata (requests i Selenium), a fuzzy sistem daje ocenu kvaliteta na skali od 0 do 10. Ova metodologija omogućava vizualizaciju procesa ocenjivanja i pruža uvid u stanje digitalnih resursa u regionu, sa ciljem identifikacije razlika i predloga za unapređenje.

II. FUZZY LOGIKA

Ovo poglavlje detaljno razmatra teorijske osnove fuzzy logike, njene fundamentalne matematičke koncepte, i arhitekturu

fuzzy kontrolnih sistema (FIS) [1]. Dubinsko razumevanje ovih principa je esencijalno za shvatanje metodologije koja je primenjena u ovom radu za evaluaciju kvaliteta veb sajtova, gde se neprecizne ljudske procene i lingvistički opisi kvantifikuju i obrađuju na sistematičan način.

A. Geneza i motivacija fuzzy logike

Fuzzy logika, koju je Lotfi A. Zadeh uveo 1965. godine svojim naučnim radom "Fuzzy Sets" [2], predstavlja fundamentalno proširenje klasične, dvovalentne (Boolean) logike. Klasična logika, zasnovana na Aristotelovim principima, operiše sa isključivo dve vrednosti istinitosti: apsolutno tačno (predstavljeno sa 1) i apsolutno netačno (predstavljeno sa 0). Međutim, mnogi problemi u stvarnom svetu, posebno oni koji uključuju ljudsko rezonovanje, percepciju i prirodni jezik, ne podležu lako ovako striktnoj binarizaciji [3]. Koncepti poput "visoka temperatura", "brza vožnja", "zadovoljavajući kvalitet", ili u kontekstu ovog rada "brzo učitavanje stranice", inherentno su neprecizni i subjektivni. Zadeh je prepoznao ovu limitaciju i predložio fuzzy logiku kao sredstvo za formalno predstavljanje i manipulaciju stepenima istinitosti. Umesto da iskaz bude samo tačan ili netačan, u fuzzy logici on može biti delimično tačan i delimično netačan, sa vrednošću istinitosti koja pripada kontinualnom intervalu [0,1]. Vrednost 0 označava potpunu neistinitost, 1 potpunu istinitost, dok vrednosti između predstavljaju parcijalnu istinitost.

B. Fundamentalni matematički Koncepti fuzzy logike

Klasičan (crisp) skup A , definisan nad univerzumom razmatranja X , može se predstaviti karakterističnom funkcijom [4]:

$$\chi_A(x) = 1, \text{ ako } x \in A; 0, \text{ ako } x \notin A. \quad (1)$$

Fuzzy skup $\tilde{A}$ je definisan funkcijom pripadnosti:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) : X \rightarrow [0, 1], \quad (2)$$

$$\tilde{A} = \{ (x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in X \}. \quad (3)$$

Za skup vremena učitavanja $X = [0, 20]$ sekundi:

$$\mu_{\tilde{B}}(1) = 0.95, \mu_{\tilde{B}}(3) = 0.6, \mu_{\tilde{B}}(5) = 0.2, \mu_{\tilde{B}}(10) = 0. \quad (4)$$

Osnovni termini fuzzy skupova su:

$$\text{Podrška: } \text{supp}(\tilde{A}) = \{ x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) > 0 \}, \quad (5)$$

$$\text{Jezgro: } \text{core}(A) = \{x \in X \mid \mu A(x) = 1\}, \quad (6)$$

$$\alpha\text{-presek: } A\alpha = \{x \in X \mid \mu A(x) \geq \alpha\}, \alpha \in (0,1], \quad (7)$$

$$\text{Visina: } \text{hgt}(\tilde{A}) = \sup_{x \in X} \mu A(x). \quad (8)$$

C. Funkcije pripadnosti (eng. Membership Functions – MFs)

Funkcije pripadnosti su srž fuzzy logike i fuzzy skupova. One kvantifikuju stepen kojim neki element univerzuma diskursa pripada određenom fuzzy skupu [5]. Za razliku od klasičnih (krisp) skupova gde element ili pripada ili ne pripada skupu (vrednosti 0 ili 1), u fuzzy logici, pripadnost je stepenovana i može uzeti bilo koju vrednost u intervalu [0, 1]. Vrednost 0 označava potpunu nepripadnost, vrednost 1 označava potpunu pripadnost, dok vrednosti između 0 i 1 označavaju delimičnu pripadnost. Izbor oblika funkcije pripadnosti zavisi od prirode problema, dostupnih podataka, ekspertize i željenog nivoa preciznosti i interpretabilnosti [6]. Trouglasta funkcija pripadnosti je definisana sa tri parametra: a , b i c , koji predstavljaju x -koordinate temena trougla. Parametar a je početna tačka (gde pripadnost počinje da raste od 0), b je vrh trougla (gde je pripadnost maksimalna, tj. 1), a c je krajnja tačka (gde se pripadnost vraća na 0). Mora važiti uslov $a \leq b \leq c$. Funkcija se često koristi zbog svoje jednostavnosti, lake definicije i intuitivne interpretacije. Dobra je za aproksimaciju nepreciznih koncepata gde postoji jasan centralni pojam i postepeno smanjenje pripadnosti udaljavanjem od njega [7].

$$\mu_{\text{nisko}}(x; a, b, c) = \max\left(0, \min\left(\frac{(x-a)}{(b-a)}, \frac{(c-x)}{(c-b)}\right)\right). \quad (9)$$

Trapezoidna funkcija pripadnosti je generalizacija trouglaste funkcije. Definisana je sa četiri parametra: a , b , c i d . Parametri a i d kod trapeza (gde je pripadnost 0) predstavljaju početak i kraj opsega neizvesnosti, dok b i c definišu mesto gde je vrednost pripadnosti jednaka 1. Vrednost jednaka 1 je poznata kao ravni deo trapeza. Mora važiti uslov $a \leq b \leq c \leq d$. Ako je $b = c$, trapezoidna funkcija se svodi na trouglastu [8].

$$\mu(x; a, b, c, d) = \max\left(0, \min\left(\frac{(x-a)}{(b-a)}, 1, \frac{(d-x)}{(d-c)}\right)\right). \quad (10)$$

Korisna je kada postoji opseg vrednosti za koje se sa sigurnošću može reći da u potpunosti pripadaju fuzzy skupu. Omogućava veću fleksibilnost od trouglaste funkcije. Gausova funkcija pripadnosti je glatka, simetrična kriva sa maksimumom u centru. Definisana je sa dva parametra: c (centar) i σ (standardna devijacija), koji određuju položaj i širinu funkcije. Pogodna je za modelovanje kontinuiranih varijabli i prirodnih fenomena gde se očekuje glatka tranzicija. Zbog svoje diferencijabilnosti, često se koristi u adaptivnim fuzzy sistemima i neuro-fazi mrežama [9].

$$\mu_{\text{srednje}}(x; c, \sigma) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (11)$$

Generalizovana funkcija sličnog oblika pruža veću fleksibilnost u oblikovanju simetričnih krivih u poređenju sa Gausovom funkcijom. Definisana je sa tri parametra: a , b i c . Koristi se kada je potrebna funkcija sa više stepeni slobode za prilagođavanje oblika podacima ili ekspertskom znanju [10].

$$\mu_{\text{vrlo visoko}}(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}}. \quad (12)$$

Singleton funkcija, poznata i kao jedinična funkcija, je najjednostavniji tip funkcije pripadnosti. Ona dodeljuje vrednost pripadnosti 1 tačno jednoj vrednosti x_0 iz univerzuma diskursa, a 0 svim ostalim vrednostima. Najčešće se koristi za predstavljajanje izlaznih fuzzy skupova u Sugeno (TSK - Takagi-Sugeno-Kang) fuzzy modelima, gde je izlaz sistema precizna (ne-fuzzy) vrednost. Takođe može predstavljati vrlo specifične ulazne uslove [11].

$$\mu_{\text{izlaz}}(x; x_0) = \begin{cases} 1, & \text{ako } x = x_0, \\ 0, & \text{ako } x \neq x_0. \end{cases} \quad (13)$$

D. Lingvističke varijable

Lingvističke varijable omogućavaju da se varijable, čije vrednosti su reči ili rečenice prirodnog jezika (ili veštačkog jezika), tretiraju na formalan način. Umesto preciznih numeričkih vrednosti, lingvističke varijable koriste lingvističke termine (npr. "visoko", "nisko", "brzo", "sporo", "toplo") za opisivanje stanja ili karakteristika sistema. Ove varijable su od suštinskog značaja jer premošćuju jaz između ljudskog, često nepreciznog, načina izražavanja i formalnog, matematičkog opisa koji je neophodan za računarsku obradu [12]. Formalno, lingvistička varijabla L se definiše kao petorka:

$$L = (X, T(L), U, G, M), \quad (14)$$

gde komponente imaju sledeće značenje:

X (Ime varijable) – Predstavlja simboličko ime lingvističke promenljive. Predstavlja koncept kojim se opisuje na primer **VeličinaVebStranice**.

$T(L)$ (Skup lingvističkih termina) - Ovo je skup svih lingvističkih vrednosti (termina) koje varijabla X može da uzme. Ovi termini su reči ili fraze iz prirodnog jezika koje opisuju različite aspekte varijable

$$X = \text{VremeUčitavanjaStranice}.$$

$$T(L) = \{„VeomaBrzo“, „Brzo“, „Prihvatljivo“, „Sporo“, „VeomaSporo“\}. \quad (15)$$

U (Univerzum vrednosti / Univerzum diskursa) – Predstavlja stvarni opseg numeričkih vrednosti koje osnovna (fizička ili merljiva) varijabla može da uzme. Svaki lingvistički termin iz $T(L)$ će biti mapiran u fuzzy skup definisan nad ovim univerzumom

$$X = \text{VremeUčitavanjaStranice}: U = [0, 20], \quad (16)$$

sekundi (gde 0 sekundi znači trenutno učitavanje, a 20 sekundi je neki praktični gornji limit za posmatranje).

G (Gramatika termina / Sintaksno pravilo) – Ovo je (često implicitno definisana) gramatika ili skup sintaksnih pravila koja omogućavaju generisanje novih termina u $T(L)$ iz postojećih. Gramatika obično uključuje upotrebu modifikatora (lingvističkih ograda ili "hedževa" poput "veoma", "malo", "ne", "više ili manje"), konektora ("i", "ili") itd.

M (Mapiranje termina u fazi skupove / Semantičko pravilo) - Ovo je semantičko pravilo (ili skup pravila) koje svakom lingvističkom terminu $t \in T(L)$ dodeljuje njegovo značenje. Značenje se formalizuje kao fuzzy skup definisan na univerzumu U . Ovaj fuzzy skup je karakterisan svojom funkcijom pripadnosti (MF), kao što su one opisane u prethodnom poglavlju (trouglasta, trapezoidna, Gausova, itd.).

E. Osnovni fuzzy logički operatori (AND, OR, NOT)

Klasična Bulova logika koristi operatore I (AND), ILI (OR) i NE (NOT) za rad sa kisp (jasnim, binarnim) vrednostima (tačno/netačno, 1/0). U fuzzy logici, ovi operatori se generalizuju kako bi mogli da rade sa stepenima pripadnosti koji se nalaze u intervalu [0, 1]. Fuzzy AND operator kombinuje dva ili više fuzzy skupa (ili stepena pripadnosti) tako da rezultujući stepen pripadnosti odražava meru u kojoj su svi uslovi zadovoljeni. U teoriji fuzzy skupova, ovo odgovara operaciji preseka fuzzy skupova. Funkcije koje realizuju fuzzy AND operaciju nazivaju se T-norme (trouglaste norme) [13].

$$Tmin(a, b) = \min(a, b), \quad (17)$$

$$Tprod(a, b) = a \cdot b. \quad (18)$$

Fuzzy OR operator kombinuje dva ili više fuzzy skupa (ili stepena pripadnosti) tako da rezultujući stepen pripadnosti odražava meru u kojoj je bar jedan od uslova zadovoljen. U teoriji fuzzy skupova, ovo odgovara operaciji unije fuzzy skupova. Funkcije koje realizuju fuzzy OR operaciju nazivaju se S-norme (ili T-konorme) [14].

$$Smax(a, b) = \max(a, b), \quad (19)$$

$$Ssum(a, b) = a + b - a \cdot b. \quad (20)$$

Fuzzy NOT operator modifikuje jedan fuzzy skup (ili stepen pripadnosti) tako da rezultujući stepen pripadnosti odražava meru u kojoj uslov nije zadovoljen. U teoriji fuzzy skupova, ovo odgovara operaciji komplementa fuzzy skupa.

$$N(a) = 1 - a. \quad (21)$$

F. Arhitektura Fuzzy Kontrolnog Sistema (FIS)

FIS predstavlja moćan alat za modeliranje i upravljanje sistemima koji su složeni, nelinearni ili za koje ne postoji precizan matematički model. Osnovna ideja FIS-a je da koristi principe fuzzy logike kako bi mapirao precizne (crisp) ulazne vrednosti u precizne (crisp) izlazne vrednosti, na način koji simulira ljudsko rezonovanje i donošenje odluka zasnovano na nepreciznim ili lingvističkim informacijama [15]. Generalna arhitektura tipičnog FIS sastoji se od nekoliko ključnih komponenti koje rade zajedno kako bi obradile ulazne podatke i generisale odgovarajući izlaz. Ove komponente su: Baza znanja (koja uključuje bazu podataka i bazu pravila), modul za fazifikaciju, mehanizam zaključivanja i modul za defazifikaciju (koji će biti detaljnije opisan kasnije, ali je bitan za dobijanje crisp izlaza). U ovom odeljku, fokusiraćemo se na prve tri komponente. Baza znanja je srce svakog FIS. Ona sadrži svo neophodno znanje o problemu koji se rešava, obično izraženo u obliku koji je blizak ljudskom razumevanju. Sastoji se iz dva glavna dela baza podataka i baza pravila. Baza podataka definiše sve lingvističke varijable koje se koriste u sistemu, kako za ulaze tako i za izlaze. Za svaku lingvističku varijablu, baza podataka specificira njene lingvističke termine (fuzzy skupove) i, što je najvažnije, odgovarajuće MFs. Kao što smo videli u prethodnim poglavljima, funkcije pripadnosti (npr. trouglaste, trapezoidne, Gausove) kvantifikuju stepen kojim data crisp vrednost pripada određenom lingvističkom terminu. Pravilan izbor i definicija funkcija pripadnosti su ključni za performanse FIS-a. Baza pravila sadrži skup fuzzy pravila oblika IF-THEN koja opisuju kako sistem treba da reaguje na različite kombinacije ulaznih

uslova. Ova pravila se najčešće dobijaju iz ekspertskog znanja, iskustva operatera ili analizom podataka.

$$R_j: \text{IF } (x_1 \text{ is } Aj1) \text{ AND } (x_2 \text{ is } Aj2) \text{ THEN } (y \text{ is } Bj). \quad (22)$$

Baza pravila efektivno enkodira kontrolnu strategiju ili logiku odlučivanja sistema u lingvističkom obliku.

Prvi korak u obradi ulaznih podataka u FIS-u je **fazifikacija**. Ovaj modul pretvara precizne ulazne vrednosti, koje sistem dobija iz senzora ili merenja, u fuzzy vrednosti, odnosno u stepene pripadnosti različitim lingvističkim terminima definisanim u bazi podataka. [16]

Za ulaznu vrednost x_0 , fuzzy vrednosti se dobijaju kao:

$$\mu_{\tilde{A}j_i}(x_0). \quad (23)$$

Mehanizam zaključivanja (ili fuzzy inferencioni motor) je komponenta koja primenjuje fuzzy logiku na fazifikovane ulaze i pravila iz baze znanja kako bi izvela fuzzy zaključke. Za svako pravilo R_j u bazi pravila postoji stepen ispunjenosti antecedensa:

$$\alpha_j = T(\mu_{\tilde{A}j_1}(x_1), \mu_{\tilde{A}j_2}(x_2), \dots). \quad (24)$$

III. TESTIRANJE SOFTVERA METODAMA BELE I CRNE KUTIJE

Testiranje softvera predstavlja ključnu fazu u razvoju informacionih sistema i aplikacija, sa ciljem identifikovanja grešaka, osiguranja funkcionalnosti i postizanja zahtevanog kvaliteta softverskog proizvoda [17]. Među najpoznatijim strategijama testiranja izdvajaju se metode **bele kutije** (engl. white-box testing) i **crne kutije** (engl. black-box testing), koje se razlikuju prema pristupu testiranju, osnovnim ciljevima i nivou uvida u unutrašnju strukturu softverskog sistema [18].

A. Testiranje metodom crne kutije

Testiranje metodom crne kutije podrazumeva evaluaciju funkcionalnosti softverskog sistema bez poznavanja unutrašnje implementacije. Test inženjer se oslanja na specifikaciju zahteva i fokusira na ulazno-izlazno ponašanje sistema. Ova metoda je posebno pogodna za testiranje na sistemskom i integracionom nivou. Ova tehnika zasniva se na principu da se celokupan ulazni prostor D može podeliti na **disjunktno ekvivalencije** $E_1, E_2, \dots, E_n$ pri čemu se pretpostavlja da će svi ulazi iz iste klase proizvesti istovetan izlaz [19]. Formalno, neka je $f: D \rightarrow R$ funkcija sistema. Definišemo relaciju ekvivalencije:

$$\forall x_i, x_j \in E_k \Rightarrow f(x_i) = f(x_j). \quad (25)$$

Cilj je da se testira po **jedan reprezentativni element** iz svake klase E_k , čime se smanjuje broj test slučajeva uz očuvanje pokrivenosti [20]. Greške se često javljaju na krajnjim vrednostima opsega. Ako je ulaz definisan u intervalu $[a, b]$, test slučajevi se biraju za vrednosti:

$$x \in \{a, a + \epsilon, b - \epsilon, b\}, \quad (26)$$

gde je ϵ najmanji mogući pomak u ulaznom domenu (npr. 1 za cele brojeve). Ova tehnika se često kombinuje sa particionisanjem ekvivalencije. Tabela odluka koristi logiku kombinatorike kako bi se definisao broj mogućih ulazno-izlaznih kombinacija. Ako postoji n binarnih uslova (da/ne), broj svih mogućih kombinacija je:

$$N = 2^n. \quad (27)$$

Međutim, u praksi se koristi **redukovana tabela** koja uključuje samo validne i relevantne kombinacije. Tabela olakšava praćenje svih mogućih poslovnih pravila u sistemima sa velikim brojem odluka. Za softver koji se ponaša kao **automat sa stanjima** (eng. finite state machine), koristi se testiranje prelaza. Neka je:

- $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ skup stanja,
- $I = \{i_1, i_2, \dots, i_k\}$ skup ulaza,
- $T: S \times I \rightarrow S$ funkcija prelaza stanja.

$$Ct = \frac{|T_{test}|}{|T_{total}|} \times 100\%, \quad (28)$$

gde je:

- $|T_{test}|$ broj prelaza koji su testirani,
- $|T_{total}|$ ukupan broj mogućih prelaza.

Testiranje se često modeluje grafom stanja, gde se svaki čvor označava stanjem, a svaka grana prelazom uz određeni ulaz. Iako se crna kutija ne bavi kodom, moguće je proceniti pokrivenost funkcionalnih zahteva [21]. Definišimo metriku pokrivenosti zahteva kao:

$$Cr = \frac{R_t}{R_{total}} \times 100\%, \quad (29)$$

gde je:

- R_t broj zahteva koji su pokriveni test slučajevima,
- R_{total} ukupan broj funkcionalnih zahteva.

Ova metrika se koristi za procenu da li su svi aspekti sistema testirani iz korisničke perspektive.

B. Testiranje metodom bele kutije

Za razliku od prethodne, testiranje metodom bele kutije zahteva potpuno poznavanje unutrašnje strukture programa. Testovi se kreiraju na osnovu logičkih i strukturalnih aspekata koda – grana, petlji, izraza i puteva [22]. Pokrivenost izraza (eng. Statement Coverage) - Osigurava da je svaki izraz u kodu izvršen bar jednom.

$$Cs = \frac{E_e}{E_t} \times 100\%. \quad (30)$$

Gde je E_e broj izvršenih izraza, a E_t ukupan broj izraza u programu. Cilj je testirati sve moguće grane uslova (true/false).

$$Cb = \frac{B_e}{B_t} \times 100\%. \quad (31)$$

Gde je B_e broj pokrivenih grana, a B_t ukupan broj grana. Jedna od važnih metrika za testiranje strukture koda jeste **McCabe-ova ciklomatska složenost**, koja se računa kao:

$$V(G) = E - N + 2P, \quad (32)$$

gde je:

- E – broj grana u grafu toka kontrole,
- N – broj čvorova,
- P – broj povezanih komponenti (obično 1 za pojedinačne funkcije) [23].

Ova vrednost predstavlja minimalan broj nezavisnih puteva koji bi trebalo biti testiran za punu pokrivenost. Razlike između bele i crne kutije prikazane su Tabelom 1.

TABELA 1. POREĐENJE MODELA BELE I CRNE KUTIJE

Osobina	Crna kutija	Bela kutija
Uvid u kod	Nije potreban	Potreban
Fokus	Funkcionalnost	Struktura i logika implementacije
Tip otkrivenih grešaka	Funkcionalne greške	Greške u kodu, logici
Primena	Sistemska i integraciono testiranje	Jedinično testiranje (unit testing)

IV. SEO OPTIMIZACIJA

SEO (eng. Search Engine Optimization) predstavlja skup tehnika i strategija usmerenih ka povećanju vidljivosti web stranica u rezultatima pretrage na internet pretraživačima (npr. Google, Bing). Cilj SEO-a jeste postizanje organskog (neplaćenog) rangiranja što bliže vrhu stranica rezultata pretrage (SERP – Search Engine Results Page), čime se povećava broj poseta i relevantnost sadržaja u odnosu na korisničke upite. Jedan od temeljnih principa SEO-a jeste analiza i implementacija **ključnih reči** koje korisnici koriste prilikom pretrage [24].

Neka je:

- $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ skup ključnih upita korisnika,
- $R(q_i)$ pozicija sajta za dati upit q_i ,
- $V(q_i)$ broj mesečnih pretraga za q_i .

Ukupan potencijalni organski saobraćaj T može se aproksimirati kao:

$$T = \sum_{i=1}^n CTR(R(q_i)) \cdot V(q_i), \quad (33)$$

gde je $CTR(R)$ funkcija stope klikova u zavisnosti od pozicije rezultata R , često modelovana logaritamski (33) [25].

$$CTR(R) = \frac{c}{\log(R+1)}. \quad (34)$$

C. Struktura i semantika sadržaja (On-page SEO)

Dobro strukturisan HTML sadržaj sa korišćenjem semantičkih oznaka (npr. <h1>, <p>,) omogućava pretraživačima bolju interpretaciju teme stranice. Korišćenje meta tagova, optimizovanih URL-ova i internog linkovanja doprinosi većem indeksiranju i boljoj SEO vrednosti stranice. Za metriku brzine sajta koristi se metrika kao što je Largest Contentful Paint (LCP), za koju se preporučuje vrednost kao na forumili (34) [26].

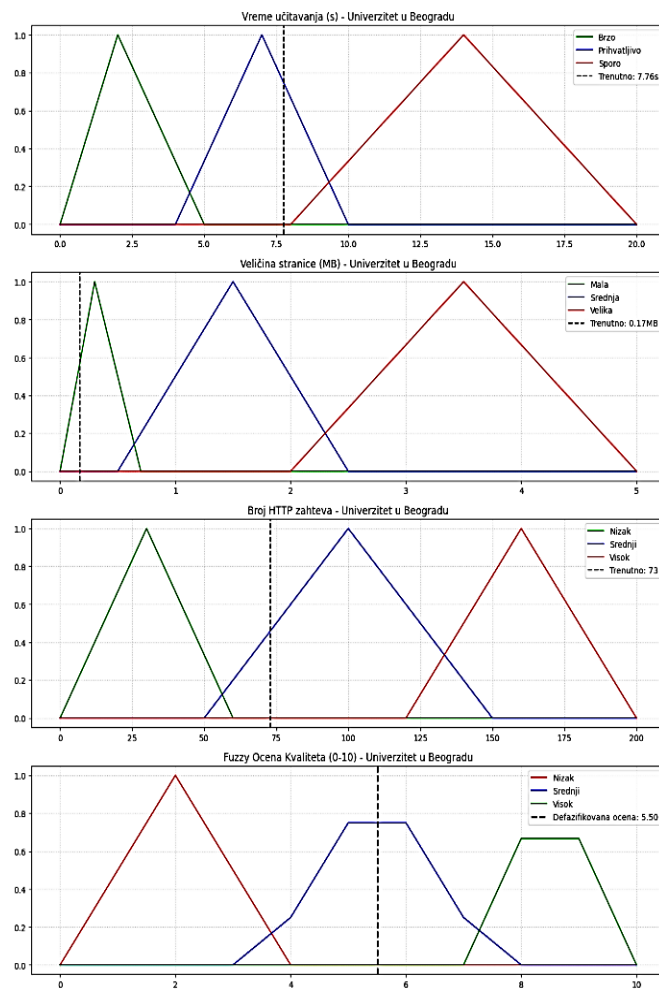
$$t_{LCP} \leq 2.5 s. \quad (35)$$

V. METODIKA ISTRAŽIVANJA

U okviru ovog istraživanja razvijen je sistematski metod za automatsku procenu kvaliteta veb stranica institucija u regionu Zapadnog Balkana, koristeći kombinaciju automatizovanog prikupljanja podataka, analize performansi i veštačke inteligencije u vidu fuzzy logike. Ovaj pristup omogućava objektivnu i sveobuhvatnu procenu veb prezentacija

univerziteta, instituta, ministarstava i srodnih ustanova. Prvi korak u istraživanju bio je izbor relevantnih institucija iz Srbije, Hrvatske, Bosne i Hercegovine, Crne Gore, Slovenije i Severne Makedonije. Za svaku instituciju definisana je početna URL adresa zvanične veb stranice. Korišćenjem biblioteka requests i Selenium, implementirani su algoritmi za preuzimanje HTML sadržaja, merenje veličine stranice u megabajtima, kao i broj HTTP zahteva izvršenih tokom učitavanja. Za pouzdanu obradu performansi korišćen je Chrome WebDriver u headless režimu, sa namenskim profilima kako bi se izbegle kolizije i poboljšala stabilnost. Na osnovu tri ulazna parametra – vreme učitavanja stranice (u sekundama), veličina stranice (u MB) i broj HTTP zahteva – kreirani su odgovarajući fuzzy skupovi. Ovi skupovi su definisani za tri nivoa: nisko, srednje i visoko (npr. "brzo", "prihvatljivo", "sporo" vreme učitavanja). Korišćenjem paketa scikit-fuzzy, izrađen je fuzzy kontroler sa skupom pravila koji mapira kombinacije ulaznih vrednosti u izlaznu vrednost kvaliteta stranice, izraženu u skali od 0 do 10. Pravila su definisana logičkim kombinacijama stanja svih ulaza, tako da se visok kvalitet dodeljuje sajtoovima koji su mali, brzo se učitavaju i imaju nizak broj zahteva. Srednje i niske vrednosti kvaliteta proizilaze iz manje optimalnih kombinacija. Rezultati evaluacije se mogu grafički prikazati pomoću matplotlib biblioteke, što omogućava dodatnu analizu distribucije kvaliteta među institucijama i poređenje između zemalja ili sektora (obrazovanje, kultura, finansije itd.) kao što je dato na primeru sa slike 1. Na osnovu priloženih rezultata, mogu se izvući značajni zaključci o tehničkom kvalitetu i performansama veb sajtova akademskih i državnih institucija u regionu. Uočeno je da veliki broj sajtova nije bio dostupan za analizu, uključujući značajne institucije iz Srbije, Hrvatske, Slovenije, Crne Gore i Severne Makedonije. Najčešći uzroci su bile greške u SSL sertifikatima (poput `DH\_KEY\_TOO\_SMALL`, `CERTIFICATE\_VERIFY\_FAILED`, self-signed sertifikata, ili hostname mismatch), problemi sa DNS-om (`NameResolutionError`), problemi sa konekcijom (`ConnectTimeoutError`, `ConnectionResetError`) i HTTP 404 greške. Ove tehničke manjkavosti ukazuju na nedostatak adekvatnog održavanja i ozbiljne propuste u bezbednosti i pristupačnosti. Pored toga, kod više sajtova evaluacija nije mogla biti uspešno izvršena zbog problema u radu fuzzy evaluacionog sistema, pri čemu je dodeljena generička ocena (5.50), što ne odražava realne performanse. Takođe, u mnogim slučajevima nedostajao je vizuelni prikaz agregiranog izlaza evaluacije, što dodatno otežava interpretaciju rezultata. Kod sajtova koji su bili dostupni, analizirani su SEO skorovi, fuzzy ocene, vreme učitavanja, veličina stranice i broj HTTP zahteva. Hrvatska i Slovenija su se pokazale kao zemlje sa najkonzistentnijim i najvišim SEO rezultatima, dok je BiH imala najveće varijacije – od veoma visokih do ekstremno niskih ocena. Kada je reč o fuzzy ocenama (0–10), koje predstavljaju zbirnu metrikaciju performansi (učitavanje, veličina stranice, broj zahteva), najviše ocene su dobili sajtovi sa minimalnim brojem zahteva, malom veličinom i brzim učitavanjem – najčešće ispod 6 sekundi. Među njima su Filološki fakultet UB, ETF Beograd, Ministarstvo finansija Hrvatske, Institut Jožef Stefan i NUB Sv. Kliment Ohridski. S druge strane, sajtovi sa velikim brojem HTTP zahteva (često preko 150), sporim učitavanjem (preko 10 sekundi) i većom

veličinom stranice (>0.3 MB) dobili su najniže fuzzy ocene, uključujući Pravni fakultet UB, Univerzitet Crne Gore i Hrvatsku narodnu banku. Jasna je korelacija između niskih tehničkih performansi i niske fuzzy ocene. Ukupno posmatrano, rezultati ukazuju na velike razlike u kvalitetu digitalne prezentacije među institucijama regiona, pri čemu su najbolje prakse i tehnički standardi приметniji kod institucija iz Hrvatske i Slovenije, dok Srbija i Crna Gora pokazuju značajne izazove u pogledu dostupnosti i održavanja. Za razliku od tradicionalnih metoda evaluacije koje se oslanjaju na stroge granične vrednosti i statičke metrike (npr. PageSpeed skor, broj HTTP zahteva, veličina stranice u kilobajtima), primena fuzzy logike omogućava suptilniji i kontekstualno osetljiviji pristup.

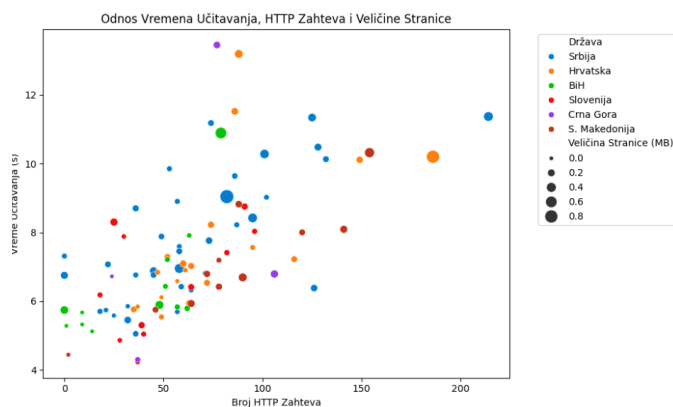


Sl. 1 Primer rešenja fuzzy testiranja softvera

Klasične metode često ne uzimaju u obzir međuzavisnost faktora – na primer, brzina učitavanja može biti odlična uprkos velikoj veličini stranice ako je hosting kvalitetan ili su korišćeni napredni mehanizmi keširanja. Fuzzy sistem omogućava procenu u „sivoj zoni“, dajući uravnoteženiju ocenu zasnovanu na kompromisima između brzine, broja zahteva i veličine sadržaja, što bolje reflektuje stvarno korisničko iskustvo. Model se može proširiti dodatnim SEO faktorima poput upotrebe semantičkih oznaka, mobilne prilagođenosti, HTTPS bezbednosti, hijerarhije naslova, alt tekstova za slike, meta tagova i link strukture. Ovi elementi doprinose boljoj

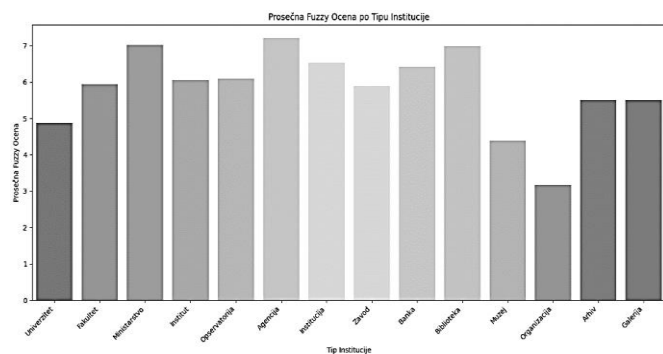
optimizaciji sajta i mogu se uključiti u fuzzy sistem kao dodatni parametri ili nezavisne metrike, čime se omogućava sveobuhvatnija evaluacija koja obuhvata i tehničke performanse i vidljivost na pretraživačima.'

Na slici 2 se prikazuju ukupne prosečne vrednosti tri ključna parametra web performansi — vreme učitavanja stranice, veličinu stranice i broj HTTP zahteva — grupisano po državama. Na osnovu ovog uporednog pregleda može se uočiti nekoliko značajnih trendova među analiziranim državama. Bosna i Hercegovina se izdvaja sa najkraćim prosečnim vremenom učitavanja, najmanjom veličinom stranica i najmanjim brojem HTTP zahteva, što ukazuje na tehnički optimizovanije web stranice, barem u proseku. S druge strane, Crna Gora ima visoko prosečno vreme učitavanja, uprkos maloj veličini stranica i nižem broju zahteva, što može ukazivati na sporije servere ili slabiju optimizaciju koda. Srbija i Hrvatska imaju nešto veće vrednosti za sve tri metrike, što sugerise na zahtevnije web stranice sa većim sadržajem i složenijom infrastrukturom, ali i na potencijalnu potrebu za dodatnom tehničkom optimizacijom. Slovenija se nalazi u sredini sa umerenom veličinom stranica i brojem zahteva, dok pruža dobro vreme učitavanja. Na kraju, Severna Makedonija pokazuje višu prosečnu veličinu stranica i broj zahteva, što može doprineti dužem vremenu učitavanja u određenim slučajevima.



Sl. 2 Odnos vremena učitavanja HTTP zahteva i veličine stranice

Na slici 3 data je prosečna fuzzy ocena po tipu institucija na primer Univerzitet, fakultet, ministarstvo, institut, opservatorija, agencija, institucija, zavod, banka, biblioteka, muzej, organizacija, arhiv, galerija. Za sve republike najbolje se pokazalo: Ministarstvo, agencija, biblioteka, banka, institucija. Najgore se pokazali: Organizacija, muzej, univerzitet.



Sl. 3 Prosečna fuzzy ocena po tipu institucije

VI. ZAKLJUČAK

Istraživanje pokazuje da primena fuzzy logike efikasno ocenjuje kvalitet veb sajtova institucija, pružajući objektivnu procenu kroz merljive parametre i vizualizaciju. Analiza je otkrila značajne razlike u tehničkoj optimizaciji među sajtovima, ukazujući na potrebu za standardizacijom i minimalnim tehničkim kriterijumima. Potencijalna unapređenja uključuju dodavanje parametara kao što su sigurnost, pristupačnost i mobilna optimizacija, kao i integraciju dinamičkog praćenja performansi. Dalja istraživanja mogu se fokusirati na povezivanje tehničkih ocena sa korisničkim zadovoljstvom. Ovaj model može poslužiti kao osnova za razvoj alata za poboljšanje digitalnih resursa javnog sektora.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, na osnovu ugovora br. 451-03-137/2025-03/200132 sa Fakultetom tehničkih nauka u Čačku, Univerziteta u Kragujevcu.

LITERATURA

- [1] Nguyen, A. T., Taniguchi, T., Eciolaza, L., Campos, V., Palhares, R., & Sugeno, M. (2019). Fuzzy control systems: Past, present and future. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 14(1), 56-68.
- [2] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.
- [3] Miclet, L., & Prade, H. (2009, July). Handling analogical proportions in classical logic and fuzzy logics settings. In *European Conference on Symbolic and Quantitative Approaches to Reasoning and Uncertainty* (pp. 638-650). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [4] Novák, V., Perfilieva, I., & Mockor, J. (2012). *Mathematical principles of fuzzy logic* (Vol. 517). Springer Science & Business Media.
- [5] Ali, O. A. M., Ali, A. Y., & Sumait, B. S. (2015). Comparison between the effects of different types of membership functions on fuzzy logic controller performance. *International Journal*, 76, 76-83.
- [6] Reddy, P. V. S. (2017). Fuzzy logic based on Belief and Disbelief membership functions. *Fuzzy Information and Engineering*, 9(4), 405-422.
- [7] Velmurugan, S., & Udhayakumar, R. (2024). Analysis of Fuzzy Membership Function on Greenhouse Gas Emission Estimation by Triangular and Trapezoidal Membership Functions in Indian Smart Cities. *Contemporary Mathematics*, 2508-2530.
- [8] Wu, D. (2012, June). Twelve considerations in choosing between Gaussian and trapezoidal membership functions in interval type-2 fuzzy logic controllers. In *2012 IEEE International conference on fuzzy systems* (pp. 1-8). IEEE.
- [9] Ajofoyinbo, A. M., Olunloyo, V. O., & Ibidapo-Obe, O. (2011). On development of fuzzy controller: The case of gaussian and triangular membership functions. *Journal of Signal and Information Processing*, 2(04), 257.
- [10] Azimi, S. M., & Miar-Naimi, H. (2020). Designing programmable current-mode Gaussian and bell-shaped membership function. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 102(2), 323-330.
- [11] Sugeno, M. (1999). On stability of fuzzy systems expressed by fuzzy rules with singleton consequents. *IEEE Transactions on Fuzzy systems*, 7(2), 201-224.
- [12] Zadeh, L. A. (1971). Quantitative fuzzy semantics. *Information sciences*, 3(2), 159-176.
- [13] Dzitac, I., Filip, F. G., & Manolescu, M. J. (2017). Fuzzy logic is not fuzzy: World-renowned computer scientist Lotfi A. Zadeh. *International Journal of Computers Communications & Control*, 12(6), 748-789.
- [14] Démoncourt, F. (2013). Introduction to fuzzy logic. *Massachusetts Institute of Technology*, 21, 50-56.
- [15] Smarandache, F. (2018). Plithogenic set, an extension of crisp, fuzzy, intuitionistic fuzzy, and neutrosophic sets-revisited. *Infinite study*.
- [16] Honda, K., Oshio, S., & Notsu, A. (2014, October). Item membership fuzzification in fuzzy co-clustering based on multinomial mixture concept. In *2014 IEEE International Conference on Granular Computing (GrC)* (pp. 94-99). IEEE.
- [17] Ammann, P., & Offutt, J. (2016). *Introduction to software testing*. Cambridge University Press.

- [18] Nidhra, S., & Dondeti, J. (2012). Black box and white box testing techniques-a literature review. *International Journal of Embedded Systems and Applications (IJESA)*, 2(2), 29-50.
- [19] Khan, M. E. (2011). Different approaches to black box testing technique for finding errors. *International Journal of Software Engineering & Applications*, 2(4), 31.
- [20] Saxena, N. (2008). Diagonal circuit identity testing and lower bounds. In *Automata, Languages and Programming: 35th International Colloquium, ICALP 2008, Reykjavik, Iceland, July 7-11, 2008, Proceedings, Part I* 35 (pp. 60-71). Springer Berlin Heidelberg.
- [21] Wang, R., Artho, C., Kristensen¹, L. M., & Stolz¹, V. (2019, November). Software testing. In *Integrated Formal Methods: 15th International Conference, IFM 2019, Bergen, Norway, December 2–6, 2019, Proceedings (Vol. 11918, p. 474)*. Springer Nature.
- [22] Jorgensen, P. C. (2013). *Software testing: a craftsman's approach*. Auerbach Publications.
- [23] McCabe, T. J. (1976). A complexity measure. *IEEE Transactions on software Engineering*, (4), 308-320.
- [24] Dick, M. (2011). Search engine optimisation in UK news production. *Journalism practice*, 5(4), 462-477.
- [25] Kumar, R., Naik, S. M., Naik, V. D., Shiralli, S., VG, S., & Husain, M. (2015, June). Predicting clicks: CTR estimation of advertisements using logistic regression classifier. In *2015 IEEE international advance computing conference (IACC)* (pp. 1134-1138). IEEE.
- [26] Edgar, M. (2024). Largest Contentful Paint. In *Speed Metrics Guide: Choosing the Right Metrics to Use When Evaluating Websites* (pp. 137-156). Berkeley, CA: Apress.

ABSTRACT

Abstract— This paper presents a methodology for evaluating the quality of websites of academic and state institutions from all six republics of the former SFRY using artificial intelligence tools, specifically fuzzy logic. A system was developed for the automatic assessment of website performance based on three key parameters: page load time, page size, and the number of HTTP requests. Based on these input values, a fuzzy control system generates a website quality score on a scale of 0 to 10, through a defuzzification process. The evaluation included websites of universities, ministries, scientific institutes, and agencies, thereby providing a comprehensive insight into the technical quality of publicly available digital resources in the region. In addition to the numerical score, the system also allows for the visualization of the membership of input values to fuzzy sets, which further explains the impact of individual factors on the overall score. The results indicate significant differences in the technical optimization of the analyzed websites, opening avenues for future improvements in the design and implementation of web presentations for institutions of public importance.

A FUZZY LOGIC-BASED MODEL FOR SOFTWARE SYSTEM QUALITY EVALUATION

Marko M. Živanović, Olga Ristić