

Primljen / Received: 4.1.2015.

Ispravljen / Corrected: 9.6.2015.

Prihvaćen / Accepted: 23.7.2015.

Dostupno online / Available online: 10.1.2016.

Procjena točnosti ANFIS-a u prognoziranju lebdećeg nanosa

Autori:



Doc.dr.sc. [Seyed Morteza Seyedian](#), dipl.ing.građ.
Sveučilište Gonbad-Kavous, Iran
Katedra za upravljanje slivovima voda
s.m.seyedian@gmail.com



Doc.dr.sc. [Hamed Rouhani](#), dipl.ing.građ.
Sveučilište Gonbad-Kavous, Iran
Katedra za upravljanje slivovima voda
rouhani.hamed@yahoo.com

Prethodno priopćenje

[Seyed Morteza Seyedian, Hamed Rouhani](#)

Procjena točnosti ANFIS-a u prognoziranju lebdećeg nanosa

U radu se istražuju mogućnosti koje pruža prilagodljivi sustav neizrazitog zaključivanja zasnovanog na neuronskoj mreži (ANFIS) u predviđanju dnevnih količina lebdećeg nanosa koje je obavljeno na četiri stanice u SAD-u. U tu su svrhu izrađeni modeli s različitim kombinacijama ulaznih podataka kao osnova za određivanje najbolje moguće strukture. Dobiveni rezultati pokazuju da se najbolji model ANFIS ponaša bolje od modela SRC s obzirom na dobivene vrijednosti RMSE, MBE i R2. Rezultati također pokazuju da se pomoću modela ANFIS može pojednostavniti modeliranje nelinearne dinamike složenih sustava.

Ključne riječi:

ANFIS, histereza, koncentracija nanosa, nanos

Preliminary note

[Seyed Morteza Seyedian, Hamed Rouhani](#)

Assessing ANFIS accuracy in estimation of suspended sediments

Capabilities offered by an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) in the estimation of daily sediment loads at four stations in the USA, are explored in the paper. For this purpose, models with various input combinations of data sets were constructed to enable identification of the best possible structure. The results show that the best ANFIS model exhibits better performance compared to the SRC model, in terms of the RMSE, MBE and R2 values. The results also indicate that the ANFIS model can be applied to facilitate modelling of nonlinear dynamics of complex systems.

Key words:

ANFIS, hysteresis, sediment concentration, sediment load

Vorherige Mitteilung

[Seyed Morteza Seyedian, Hamed Rouhani](#)

Genauigkeitsabschätzung des ANFIS bei der Prognose von Schwebablagerungen

In dieser Arbeit werden die Möglichkeiten veränderlicher Systeme indirekter Schlussfolgerungen aufgrund neuronaler Netze (ANFIS) bei der Vorhersage täglicher Mengen von Schwebablagerungen untersucht, die an vier Stationen in den USA durchgeführt wurden. Dazu wurden vier Modelle mit verschiedenen Kombinationen von Eingangsparametern als Grundlage zur Ermittlung der optimalen Struktur erstellt. Die Resultate zeigen, dass sich in Bezug auf die gegebenen Werte RMSE, MBE und R2 das beste ANFIS Modell besser als das SRC Modell verhält. Außerdem geht aus den Resultaten hervor, dass sich aufgrund des ANFIS Modells die Modellierung komplexer nichtlinearer dynamischer Systeme vereinfachen lässt.

Schlüsselwörter:

ANFIS, Hysterese, Konzentration von Ablagerungen, Ablagerungen

1. Uvod

Informacije o količini, kvaliteti i dinamici nanosa od presudne su važnosti za projektiranje brana, pronos nanosa, sprečavanje onečišćavanja u jezerima i rijekama, očuvanje staništa riba, upravljanje slivovima itd. Postupak izravnog mjerenja nanosa je najpouzdaniji pristup, ali je skup i ne može se provesti na tako velikom broju vodotoka kao mjerenja protoka [1]. S druge strane, većina jednadžbi za pronos nanosa izvodi se iz detaljnih podataka o protoku i karakteristikama nanosa. Tradicionalno se utjecaj kratkoročne dinamike olujnog događaja na nanos opisuje krivuljama za predviđanje koncentracije lebdećeg nanosa (eng. *suspended sediment concentration* - SSC) ili lebdećeg nanosa (eng. *suspended sediment load* - SSL) prema protoku vodotoka (Q) u nekom području [1-10]. Krivulja nanosa iskazuje se na sljedeći način, prema [11, 12, 3]:

$$Q_s = a \cdot Q^b \quad (1)$$

gdje Q_s predstavlja SSL (tona/dan) ili (gr/l), Q (m^3/s) je protok vodotoka, a je koeficijent protoka, dok je b eksponent protoka. Zbog velike varijabilnosti protoka i koncentracije lebdećeg nanosa (SSC) [13], ovaj odnos obično nije homogen niti u vremenu niti između različitih događaja, zbog čega bilježimo velik rasap parova podataka SSC-protok. S druge strane, transport nanosa i vode može dovesti do efekta histereze, tj. do različitih koncentracija nanosa kod jednakih protoka na uzlaznom i silaznom kraku hidrograma [14-16].

Stoga se može reći da modeliranje vrijednosti SSC-protok još uvijek predstavlja velik izazov i to ponajviše zbog nelinearnog i histereznog ponašanja. Prema radu [13], na oblik krivulje protoka najviše utječe izvor nanosa, dominantni oblik mreže kanala, a donekle i položaj poprečnog presjeka u riječnom slivu. Zbog velikog broja (nepoznatih) parametara koji su povezani s ovom pojavom, potrebno je sofisticirano računalno modeliranje i provođenje simulacija da bi se tražene vrijednosti što bolje predvidjele te da bi se omogućilo definiranje nelinearnih odnosa između varijabli. U novije se vrijeme sve više bilježi porast zanimanja za "meke" računalne metodologije, a naročito za umjetne neuronske mreže (eng. *artificial neural network* - ANN) i za prilagodljive sustave neizrazitog zaključivanja zasnovane na neuronskoj mreži ANFIS (eng. *adaptive neuro-fuzzy inference system* - ANFIS), da bi se tako što bolje modelirala ova pojava te da bi se utvrdili nelinearni odnosi između varijabli.

Unatoč velikoj fleksibilnosti sustava ANN u sferi modeliranja hidroloških nizova, takvi modeli ponekad nisu pogodni za rješavanje situacija u kojima su fluktuacije signala izuzetno nestacionarne te gdje se fizikalni hidrološki procesi odvijaju u velikim rasponima vrijednosti, počevši od jednog dana pa do nekoliko desetljeća. U takvim nesigurnim situacijama, za procjenjivanje nesigurnosti u realnim situacijama može se koristiti sustav neizrazitog zaključivanja (eng. *fuzzy inference system* - FIS). Hibridna primjena sustava ANN i FIS jedna je od središnjih točaka današnjih istraživanja, jer se na taj način udružuju pojedinačne prednosti sustava ANN i FIS pa je tako i nastao akronim ANFIS.

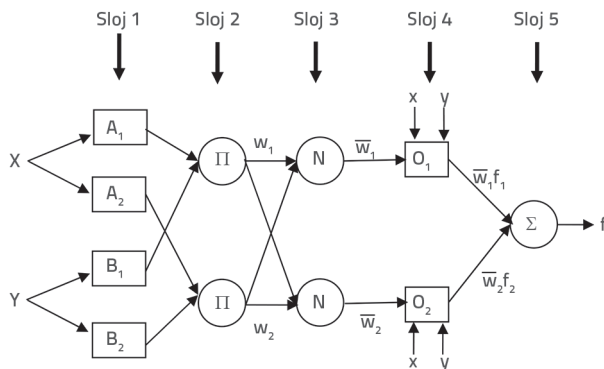
Do sada je provedeno nekoliko istraživanja o primjeni ANFIS-a u predviđanju nanosa. U mnogim je istraživačkim radovima u tijeku dokazivanja koncepta primjene ANFIS-a utvrđeno da se taj model ponaša vrlo dobro u usporedbi s konvencionalnim modelima krivulja nanosa, te da uzima u obzir i složene nelinearne pojave [17-19]. Kisi i Shiri [20] usporedili su tehniku genetičkog programiranja (eng. *genetic programming* - GP) s modelima ANFIS, ANN i SVM (eng. *support vector machine*, potporni vektorski stroj) u svrhu prognoziranja dnevnih lebdećih nanosa na dvije stanice na rijeci Comberland u SAD-u. Nakon usporedbe rezultata, ustanovljeno je da je genetičko programiranje prikladnije od modela ANFIS, ANN i SVM. Kisi [21] je modelirao koncentraciju lebdećeg nanosa pomoću metoda ANFIS i ANN te je ustanovio da je model ANFIS prikladniji od modela ANN. U radu [22] težište se stavlja na prednosti metode ANFIS u odnosu na modele ANN i SRC (eng. *sediment rating curve*, krivulja pronosa nanosa) u prognozi mjesečnih lebdećih nanosa na stanicama Kuylus i Salur Koprusu u slivu Kizilirmak u Turskoj. Aytek i Kisi [23] primijenili su tehniku GP za prognozu pronosa lebdećeg nanosa te su ustanovili da je taj postupak pogodniji od konvencionalne krivulje nanosa i višestruke linearne regresije. Rajaei i dr. [24] koristili su se metodama ANFIS, SRC i ANN za prognoziranje dnevnih koncentracija lebdećeg nanosa. Ustanovili su da je najpogodnija metoda ANFIS te da se istom metodom može na zadovoljavajući način simulirati pojava histereze. Yang i dr. [25] analizirali su predviđanje ukupnog pronosa nanosa pomoću modela ANN. Za izučavanje modela ANN korišteni su podaci o prosječnoj brzini toka, nagibima vodne površine, prosječnoj dubini toka i srednjem promjeru čestica. U zasebnoj je studiji Rajaei [26] istražio zajedničku primjenu metoda ANN i WANN (eng. *wavelet artificial neural network*, hrv. valična neuronska mreža) za predviđanje dnevnih lebdećih nanosa u rijekama. Rezultati su pokazali da se modelom WANN histereza može simulirati bolje nego primjenom drugih modela. Osim toga, modelom ANN histereza se mogla simulirati samo u jednom slučaju, dok se modelom SRC takva simulacija uopće nije mogla provesti. Jain [27] je prikazao primjenu postupka podržane vektorske regresije (eng. *support vector regression* - SVR) u svrhu modeliranja odnosa između riječnog protoka i koncentracije nanosa, te je usporedio dobivene rezultate s rezultatima modela ANN. Utvrđeno je da je postupak SVR prikladniji od metode ANN.

Iz navedenog prikaza vidimo da je, bez obzira na brojna istraživanja odnosa između protoka i nanosa pomoću različitih sofisticiranih postupaka, najveća usredotočenost na razvoju optimalnih parametara za model ANFIS kako bi se na taj način predvidio lebdeći nanos, nakon čega bi se model mogao djelotvorno provjeriti u pogledu vršnih vrijednosti lebdećeg nanosa ili histereze. Cilj je ovog rada analizirati utjecaj različitih ulaznih podataka na točnost prognoze lebdećeg nanosa. U tom su smislu istraživane najbolje kombinacije ulaznih podataka za predviđanje histereznog ponašanja i vršnih vrijednosti nanosa pomoću odgovarajućih struktura ANFIS na četiri vodomjerne stanice u SAD-u.

2. Podaci i metoda

2.1. ANFIS

ANFIS je višeslojni prilagodljivi sustav neizrazitog zaključivanja zasnovan na neuronskoj mreži [29]. Prilagodljiva neuronska mreža je strukturirana mreža koja se sastoji od određenog broja čvorova međusobno povezanih pomoću usmjerenih veza. Svaki čvor karakterizira određena funkcija s fiksnim ili promjenljivim parametrima. Faza izučavanja ili osposobljavanja neuronske mreže je proces u okviru kojeg se određuju vrijednosti parametara koji su dovoljno podudarni s podacima za izučavanje. Osnovno pravilo učenja je dobro poznata metoda povratnog prostiranja (eng. *back propagation*) u okviru koje se pogreška pokušava svesti na minimum, obično pomoću zbroja razlike kvadrata između izlaza mreže i poželjnih izlaza [30]. Prednost oblikovanja ANFIS-a sastoji se u kombiniranju sposobnosti neizrazitog donošenja odluka s mogućnošću izučavanja koju pruža ANN da bi se tako prikazala dinamika nelinearnog sustava. ANFIS se može izraditi kao petoslojna mreža višeslojnih perceptrona (eng. *multilayer perceptron - MLP*) koja je prikazana na slici 1.



Slika 1. Tipična struktura ANFIS

Prema slici 1., pet prikazanih slojeva djeluje kako slijedi:

Sloj (1): X i Y su dvije tipične ulazne vrijednosti unesene u dva ulazna čvora koji nakon toga pretvaraju te vrijednosti u funkcije pripadnosti

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

$$O_i^1 = \mu_{B_{i-2}}(y) \quad i = 3, 4$$

gdje je X (ili Y) ulaz dok je μ_{A_i} (ili $\mu_{B_{i-2}}$) neizraziti niz povezan s tim čvorom.

Sloj (2): Svaki čvor u ovom sloju umnožava ulazne signale. Izlaz O_i^2 čvora *i* može se izračunati ovako:

$$O_i^2 = W_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y) \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

Sloj (3): Takvi umnošci ili jačine bljeska zatim se uprosječuju:

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{W_1}{W_1 + W_2} \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

Sloj (4): Čvor *i* u ovom sloju izračunava doprinos *i*-tog pravila u izlaznoj funkciji modela, koja se definira na osnovi metode prvog reda kao [31]:

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i X + q_i Y + r_i) \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

gdje je \bar{w} izlaz iz sloja 3 dok su p_i, q_i, r_i nizovi parametara.

Sloj (5): Jedinim čvorom koji se nalazi u ovom sloju izračunava se težinski globalni izlazni podatak sustava ovako:

$$O_i^5 = \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (6)$$

Dodatne informacije o ANFIS-u i hibridnom algoritmu mogu se naći u radu [32].

2.2. Analiza podataka i statistička analiza

Vremenske serije podataka o protoku i nanosu, koje su korištene u ovom istraživanju, prikupljene su na četiri vodomjerne stanice kojima upravlja Geološki institut SAD-a. Radi se o stanicama: 1100000 (rijeka Merrimack u Lowellu, New Hampshire), 1491000 (rijeka Choptankriver u blizini

Tablica 1. Vodomjerne stanice i karakteristike njihovih slivova

Vodomjerna stanica	Oznaka stanice	Opis stanice	Geografska širina	Geografska dužina	Slivno područje [km ²]	Datum prikupljanja podataka dan/mjesec/godina
Stanica 1	1100000	Rijeka Merrimack u Lowellu	42°38'45"	71°17'56"	12005	25/05/1967 - 28/09/1972
Stanica 2	1491000	Choptank kod Greensboroa	38°59'50"	75°47'10"	292,67	02/10/1980 - 30/09/1989
Stanica 3	1570500	Rijeka Susquehanna u Harrisburgu	40°15'17"	76°53'11"	62419	01/01/1976 - 30/09/1979
Stanica 4	1573000	Potok Swatara kod Harper Taverna	40°24'09"	76°34'39"	872,83	08/05/1959 - 30/09/1960 01/10/1976 - 31/12/1978

Tablica 2. Statističke karakteristike izmjerenog protoka [m³/s] i SSL [tona/dan]

	Oznaka stanice	Vrsta podatka	x_{min}	x_{mean}	x_{max}	Sx	Csx
Izučavanje	1	Protok	9,54	220,09	1210	216,90	0,98
		Nanos	1,80	579,02	24500	1912,76	3,30
	2	Protok	0,07	3,39	65,7	5,17	1,52
		Nanos	0,02	5,04	351	19,35	3,84
	3	Protok	138	1203,78	11600	1313,61	1,09
		Nanos	57	8348,11	287000	26372,36	3,16
	4	Protok	0,93	19,42	306	29,81	1,54
		Nanos	0	232,50	18100	1108,65	4,77
Testiranje	1	Protok	12,5	208,66	1210	219,22	1,05
		Nanos	7	595,02	26300	2025,60	3,40
	2	Protok	0,12	3,59	63,1	5,41	1,51
		Nanos	0,02	6,08	406	25,22	4,15
	3	Protok	136	1165,11	9800	1284,24	1,10
		Nanos	66	6911,12	135000	17442,14	2,52
	4	Protok	1,36	17,86	228	26,84	1,50
		Nanos	0	174,71	7440	714,81	4,09

Greensboro, Maryland), 1570500 (rijeka Susquehanna u Harrisburgu, Pennsylvania) i 1573000 (potok Swatara na lokaciji Harper Tavern, Pennsylvania). Te se stanice i dalje spominju istim redoslijedom kao stanica 1, stanica 2, stanica 3 i stanica 4. Te vodomjerne stanice, njihove geografske koordinate i razdoblja prikupljanja podataka prikazani su u tablici 1. U tablici 2. su ukratko prikazane statističke značajke mjenog protoka i lebdećeg nanosa (SSL) u nizovima za izučavanje i testiranje, a to su: minimum (x_{min}), maksimum (x_{max}), srednja vrijednost (x_{mean}), standardna devijacija (Sx) i koeficijent varijacije (Csx). Uočljiva je razlika između podataka o SSL-u i protoku. Prema tablici 2., vrijednost Csx podataka SSL gotovo je tri puta veća od vrijednosti protoka.

2.3. Kriteriji ocjenjivanja

Učinkovitost modela ocijenjena je pomoću kvantitativne statističke analize koja uključuje korijen srednje kvadratne pogreške (eng. *root mean square error* - RMSE), srednju apsolutnu pogrešku (eng. *mean absolute error* - MAE) i koeficijent determinacije (R^2). R^2 je podatak koji pruža određene informacije o prikladnosti modela. U regresiji, koeficijent determinacije R^2 je statistički pokazatelj koji objašnjava u kojoj se mjeri regresijska linija podudara s izmjerenim podacima. Osim toga, R^2 odražava i odnos ukupne varijancije u analiziranim podacima koji model može objasniti [33]. Razne vrste informacija o sposobnostima predviđanja modela mogu se izmjeriti pomoću vrijednosti RMSE i MAE te njenog zapisa u obliku srednje pristrane pogreške (eng. *mean bias error* - MBE) kod kojeg se uzimaju u obzir predznaci odstupanja. Vrijednost RMSE ocjenjuje podudarnost u odnosu na vrijednosti

visokog koeficijenta protoka, dok MBE određuje ujednačeniju perspektivu podudarnosti pri umjerenim koeficijentima protoka [34]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n A_i - B_i}{n} \quad (8)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (B_i - \bar{B})^2}} \quad (9)$$

gdje je n broj članova niza podataka, A_i i B_i su izmjerene tj. procijenjene vrijednosti, \bar{A} i \bar{B} su srednje vrijednosti izmjerenih tj. procijenjenih vrijednosti.

2.4. Razvoj modela ANFIS

U literaturi koja se odnosi na ANFIS ne spominju se neka posebna pravila za preraspodjelu podataka na skup za izučavanje i testiranje. Međutim, od svih ulaznih/izlaznih podataka, za izučavanje se obično koristi 75 % dok se preostalih 25 % koristi za testiranje modela. U ovom su ispitivanju nasumce odabrani podaci za izučavanje i testiranje. Jedan od najvažnijih koraka u razvoju zadovoljavajućeg modela za predviđanje jest odabir ulaznih varijabli, čime se određuje struktura modela ANFIS te se utječe na težinski koeficijent i rezultate modela [35].

Tablica 3. Sažeti prikaz konačnog izgleda modela ANFIS

Ulaz u model	Oznaka stanice	Ulazna MF	Izlazna MF	Broj ulaznih MF	Broj neizrazitih pravila
Q_t	1	^a Gauss2	Linearna	3	3
	2	^b Tri	Linearna	4	4
	3	^c Gbell	Konstantna	4	4
	4	^d psig	Linearna	3	3
Q_t, T	1	^e Pi	Konstantna	3 3	9
	2	Gauss2	Konstantna	4 4	13
	3	Gbell	Konstantna	3 3	8
	4	Gbell	Linearna	4 4	15
Q_t, Q_{t-1}	1	Pi	Konstantna	2 2	4
	2	Gauss2	Linearna	2 2	4
	3	Gbell	Konstantna	4 4	16
	4	^f tarp	Konstantna	3 3	9
Q_t, Q_{t-1}, T	1	Tri	Linearna	3 3 3	23
	2	Gauss	Konstantna	3 3 3	22
	3	Gbell	Konstantna	3 3 3	8
	4	Gbell	Konstantna	3 3 3	12
Q_t, Q_{t-1}, SSL_{t-1}	1	Tri	Konstantna	3 3 3	16
	2	Gbell	Konstantna	3 3 3	27
	3	Tri	Konstantna	3 3 3	15
	4	Gauss2	Konstantna	3 3 3	23

^a Funkcija pripadnosti bazirana na kombinaciji dviju Gaussovih funkcija, ^b Trokutasta funkcija pripadnosti
^c Generalizirana zvonasta funkcija pripadnosti, ^d Produkt dviju sigmoidnih funkcija pripadnosti
^e Funkcija pripadnosti u obliku slova π , ^f Trapezoidna funkcija pripadnosti, MF - funkcija pripadnosti (eng. *membership function*)

Korištene su različite kombinacije vrijednosti iz prethodnog dana (antecedentata), te vrijednosti dnevnih protoka i dnevnih vrijednosti SSL ili SSC da bi se izgradila odgovarajuća ulazna struktura. Općenito uzevši, mogu se razviti dvije vrste modela vremenskih serija: univarijatni i multivarijatni. Stoga je ANFIS razvijen za modeliranje univarijatnih i multivarijatnih vremenskih serija u kojima univarijatni modeli koriste samo podatke o sadašnjim i prijašnjim protocima, a multivarijatni modeli koriste podatke o protoku i o nanosu. Izvedeno je pet različitih modela ANFIS za predviđanje vrijednosti SSL (SSC) za četiri nizvodne stanice riječnog sustava i u tu su svrhu korišteni sljedeći ulazni vektori:

- (1) Q_t
- (2) Q_t, T
- (3) Q_t, Q_{t-1}
- (4) Q_t, Q_{t-1}, T
- (5) Q_t, Q_{t-1}, SSL_{t-1} ili (SSC_{t-1})

gdje je Q_t protok t - dana, Q_{t-1} je protok t - prvog dana, SSL_{t-1} ili SSC_{t-1} su lebdeći nanos i koncentracija na t - prvog dana, dok je T centralizirano vrijeme za datume.

Napisan je programski kod u programu MATLAB pomoću alata neizrazite logike (fuzzy toolbox) u svrhu simuliranja ANFIS-a. Tim su kodom simulirana različita oblikovanja ANFIS-a te je na taj način dobivena odgovarajuća struktura modela. Za sve je modele izučavanje provedeno pomoću optimalne hibridne metode. Ta je metoda kombinacija metode povratnog prostiranja i metode najmanjih kvadrata koje se primjenjuju za izučavanje mreže. Cilj je bio svesti na minimum pogrešku između izlaznog podatka ANFIS-a i poželjnog odziva (SSL ili SSC). Za svaki model ANFIS ispitane su različite vrste ulaznih funkcija pripadnosti (trokutaste, trapezne, Gaussove i Gumbelove). Faza izučavanja provedena je primjenom postupka pokušaja i pogreške, a pritom su korišteni razni procjenitelji strukture radi određivanja optimalnog niza neizrazitih pravila. Optimalne vrijednosti prikazane su u tablici 3. Iz te se tablice jasno vidi da najbolje vrste ulaznih funkcija nisu jednake za sve stanice i za različite ulazne modele te da se u većini modela konstantna funkcija pripadnosti (eng. *membership function* - MF) ponaša bolje od linearne funkcije. Prihvaćeno je da su za ANFIS model tri ili četiri funkcije pripadnosti dovoljne za modeliranje vrijednosti SSL (lebdećeg nanosa).

3. Rezultati i rasprava

Statističke vrijednosti najbolje ulazne kombinacije nizova za izučavanje i testiranje modela ANFIS prikazane su za sve stanice u tablici 4. Vrijednosti R^2 za izučavanje modela ANFIS varirale su od 0,80 do 0,87 na četiri stanice za ulazni model M1 kada je za prognozu vrijednosti SSL korišten samo protok tekućeg dana. Isto tako, vrijednosti R^2 varirale su od 0,87 do 0,94 kada su se za ulazni model M2 u fazi izučavanja koristile vrijednosti protoka tekućeg dana i centraliziranog vremena za datume izvedene iz prije spomenutih analiza. Najviše vrijednosti R^2 dobivene su na vodomjernoj stanici 4, a vrijednosti od 0,87 do 0,94 su dobivene za modele M1 i M2 na nizu podataka za izučavanje. Kada je i antecedentni protok bio uključen u ulaznu matricu, raspon vrijednosti R^2 povećao se na svim vodomjernim stanicama kao primjerice na modelima M3 i M4 gdje su vrijednosti R^2 varirale od 0,90 do 0,94 tj. od 0,94 do 0,96. U modelu M4, više vrijednosti MBE i RMSE označavaju veću pogrešku, što upućuje na slabiju podudarnost između modeliranih i izmjerenih vrijednosti. Od pet modela ANFIS, model M5 bio je donekle učinkovitiji od ostalih na tri od četiri stanice, što je rezultiralo najvišim vrijednostima koeficijenta determinacije (0,92-0,96). Osim toga, ustanovljeno je da su vrijednosti RMSE i MBE, dobivene na modelu M5 za niz podataka za tu stanicu, niže od vrijednosti koje su dobivene pomoću drugih modela. Na istom su modelu dobivene najniže vrijednosti MBE u usporedbi s ostalim modelima na svim

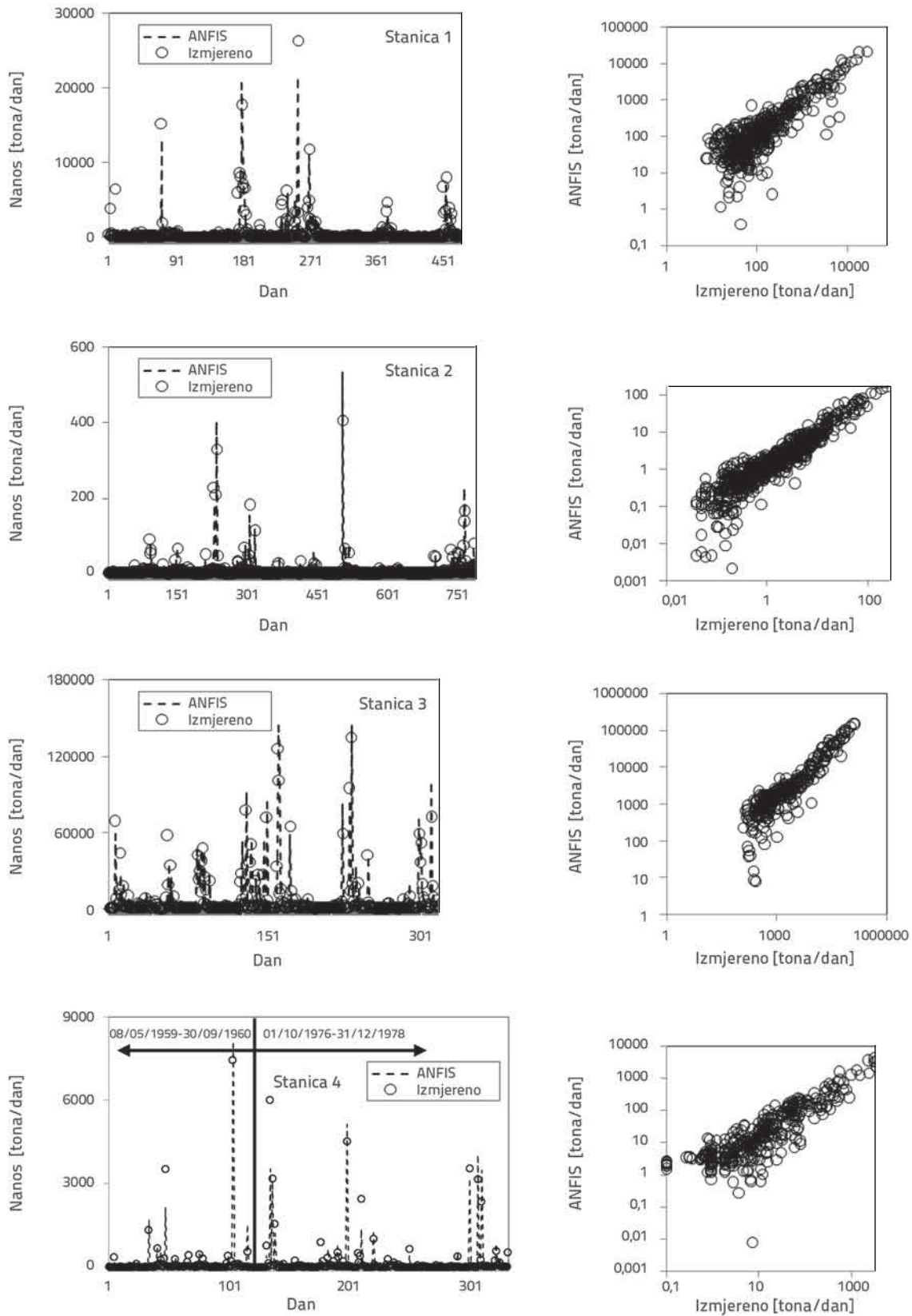
stanicama. Najbolje ulazne kombinacije razvrstane su u fazi izučavanja od najnižih do najviših, po modelima od M1 do M5, za sve stanice (osim stanice 1) u tablici 4. Najviše vrijednosti R^2 dobivene su za model M4 na stanici 1. Usporedbom ulaznih parametara ustanovljeno je da je parametar T gotovo neučinkovit na stanici 4, dok je na drugim stanicama taj parametar doveo do poboljšanja rezultata u drugoj i četvrtoj kombinaciji i s njim su postignute najtočnije procjene.

U fazi testiranja svi su modeli korišteni za prognoziranje vrijednosti SSL (SSC) pomoću neovisnog niza podataka za izučavanje. Kao što se može vidjeti u tablici 4., za razliku od rezultata dobivenih u fazi izučavanja, model M2 pokazao se u fazi testiranja uglavnom prikladnijim od modela M3 na svim stanicama osim na stanici 4. Uz to, model koji se pokazao najboljim u fazi izučavanja (model M5) bio je kontinuirano bolji od ostalih u stadiju testiranja, i to na svim stanicama osim na stanici 1. Treba također istaknuti da je parametar T poboljšao točnost predviđanja u fazi izučavanja na svim stanicama osim na stanici 4. To bi se moglo objasniti činjenicom da podaci s ove mjerne stanice sadrže razdoblje bez mjerenja od 16 godina te da je zabilježeno ekstremno povećanje u vrijednostima parametra T u drugom dijelu niza u odnosu na prvi dio niza podataka. Postupak ANFIS nije se mogao primijeniti za adekvatno simuliranje tih promjena, pa stoga nije prihvaćeno da taj parametar utječe na predviđene vrijednosti na toj stanici. Wang i Linker [36] koristili su nelinearnu regresiju kako bi

Tablica 4. Učinkovitost modela SRC i ANFIS u simulaciji vrijednosti SSL na pojedinim vodomjernim stanicama (RMSE i MBE = tona/dan)

Analizirani modeli				Stanica							
				Izučavanje				Testiranje			
Oznaka	Ulazni vektori	Vrsta	Statistički pokazatelji	1	2	3	4	1	2	3	4
M1	Q_t	SRC	R^2	0,84	0,83	0,78	0,73	0,80	0,80	0,80	0,72
			RMSE	774	8,0	8465	580	923	11,9	6850	413
			MBE	-91,7	0,5	368	42	-84,2	-0,1	1679	60
		ANFIS	R^2	0,87	0,85	0,80	0,88	0,88	0,84	0,80	0,73
			RMSE	693	7,4	11714	387	723	10,8	10158	454
			MBE	0,0	0,0	120	0	-29,1	-0,7	793	21
M2	Q_t, T	ANFIS	R^2	0,94	0,91	0,87	0,91	0,90	0,91	0,83	0,72
			RMSE	477	5,8	9503	337	641	9,5	7287	430
			MBE	0,3	0,0	284	3	-10,8	-1,1	-10	5
M3	Q_t, Q_{t-1}	ANFIS	R^2	0,90	0,92	0,90	0,94	0,86	0,84	0,83	0,83
			RMSE	616	5,4	8198	267	750	10,1	8133	315
			MBE	0,0	0,8	81	8	-23,5	-0,1	170	11
M4	Q_t, Q_{t-1}, T	ANFIS	R^2	0,96	0,94	0,94	0,94	0,87	0,85	0,85	0,79
			RMSE	401	4,8	6217	271	739	9,9	6945	349
			MBE	-0,6	0,0	2494	12	-35,8	-0,2	2807	-10
M5	Q_t, Q_{t-1}, SSL_{t-1}	ANFIS	R^2	0,92	0,96	0,95	0,95	0,86	0,95	0,94	0,91
			RMSE	548	3,6	5796	244	764	6,9	4746	223
			MBE	0,0	0,3	0	9	-16,8	0,2	1	2

R^2 - koeficijent determinacije, RMSE - korijen srednje kvadratne pogreške (eng. *root mean square error*), MBE - srednja pristrana pogreška (eng. *mean bias error*)



Slika 2. Predviđanje vrijednosti SSL pomoću modela M5 na četiri stanice u fazi testiranja

pokazali da se parametrom T može iskazati utjecaj dugoročnih promjena u nanosu, ali se s ANFIS-om nisu mogle provesti pouzdane simulacije pomoću tog parametra u slučajevima kada je postojao dugi vremenski razmak između podataka. Za parametar T, koji je određen vremenom, nisu potrebni mjereni podaci pa se stoga može jednostavno izračunati te može dovesti do točnije procjene koncentracije nanosa. Korištenjem ovog parametra simulacija postaje pouzdanija. U trećem modelu se pogreška u rezultatima smanjila dodavanjem ulaznih podataka Q_{t-1} podacima Q_t . Smanjenje pogreške na stanicama od 1 do 4 iznosilo je 12 %, 37 %, 43 % i 45 % u fazi izučavanja, a -4 %, 7 %, 25 % i 44 % u fazi testiranja. Međutim, treba napomenuti da je pogreška u testiranju bila nešto viša na stanici 1. Kada je u model M5 uključen parametar SSL_{t-1} , pogreška je bitno smanjena pa je tako na stanicama od 2 do 4 smanjena za 50 %, 41 % i 9 % u fazi izučavanja, tj. za 46 %, 71 % i 41 % u fazi testiranja. Na stanici 1 pogreška je smanjena za 12 % u fazi izučavanja, ali je donekle povećana u fazi testiranja. Općenito uzevši, model M4 pokazao se točnijim od modela M3 na svim stanicama, dok je model M2 bio točniji od modela M1. Usporedbom regresijskog modela i prvog modela (Q_t) ustanovljeno je da je regresijski model bio znatno pogodniji od modela ANFIS u fazama izučavanja i testiranja na stanici 3, te u fazi testiranja na stanici 4. Može se reći da su na ostalim stanicama ANFIS-om postignuti rezultati koji su bolji od onih dobivenih na regresijskom modelu. Stoga je model ANFIS, koji kao ulazne podatke koristi protok tekućeg dana, antecedentni protok i antecedentni SSL (SSC), odabran kao najpogodniji za prognoziranje vrijednosti SSL (SSC). Vremenske varijacije izmjerenih i prognoziranih vrijednosti SSL prikazane su na slici 2. pomoću modela M5 za fazu testiranja te za svaku stanicu. Osim toga, za svaku pojedinu stanicu grafički su zajednički prikazane predviđene i izmjerene vrijednosti SSL. Na dijagramu rasipanja može se vidjeti da su predviđene vrijednosti dobivene modelom M5 nešto bliže liniji točne podudarnosti na stanicama 2 i 3, ako ih usporedimo sa stanicama 4 i 1, i to naročito u području viših vrijednosti. Kada se ti grafički prikazi razmotre zajedno s rezultatima iz tablice 4., vidimo da je za puni raspon vrijednosti SSL analiziranih u ovom radu učinkovitost modela najbolja kod modela M5, u usporedbi s vrijednostima koje su dobivene na drugim modelima ANFIS-a i na modelu SRC. To dodano potvrđuju više vrijednosti R^2 i niže vrijednosti RMSE i MBE dobivene modelom M5.

3.1. Pogreška predviđanja vršnih vrijednosti SSL

Vršne vrijednosti nanosa izmjerene u fazi testiranja uspoređene su na svim stanicama s predviđenim vrijednostima SSL da bi se odredila točnost rezultata dobivenih pomoću raznih modela ANFIS. U tablici 5. prikazani su podaci o statističkoj prikladnosti različitih modela za određivanje maksimalnih gubitaka SSL tijekom testiranja. U toj se tablici vidi da se svakim modelom dobivaju različiti rezultati na različitim stanicama. Na primjer, model M1 koji

sadrži Q_t (protok u istom danu) za niz podataka na stanici 1 bio je najmanje učinkovit u odnosu na druge modele ANFIS. Rezultati tog modela bili su na stanici 2 gotovo isti kao i kod modela M2, a na stanici 3 taj je model bio čak i lošiji od regresijskog modela. Bolji su rezultati postignuti kada je u postupak određivanja Q_t u ulaznoj matrici (model M2) uključen parametar T, a raspon pogrešaka izrazito se smanjio za 5 do 77 % na sve četiri vodomjerne stanice.

Dodavanjem parametra T u ulaznu kombinaciju, pri čemu su ulazne vrijednosti bile Q_t , Q_{t-1} , donekle je poboljšana sposobnost predviđanja vrijednosti SSL na stanici 3. Međutim ista poboljšanja nisu postignuta na drugim stanicama. Općenito uzevši, to znači da parametar T može utjecati na modele u smislu poboljšanja točnosti predviđanja ako se iz ulaznih podataka izbací antecedentni protok (Q_{t-1}) jer, u suprotnom, uključenje vrijednosti T u ulazne podatke dovodi do povećanja vremena izučavanja bez povećanja učinkovitosti modela.

Analizom sveukupnih rezultata utvrđeno je da su najviše vrijednosti R^2 dobivene pomoću modela 5 kojim se u analizu uključuje protok (Q_t), antecedentni protok (Q_{t-1}) i antecedentni nanos (SSL_{t-1}). Najniže vrijednosti RMSE i MBE pokazale su se učinkovitijima od drugih kombinacija u simuliranju nanosa koji odgovara maksimalnom protoku na svim stanicama osim na stanici 1. Modeli M2, M3 i M4 bili su učinkovitiji od modela M5 na stanici 1.

Vršne vrijednosti SSL ovise o mnogim faktorima, pa se modelom koji kao ulazni podatak koristi samo protok u istom danu (Q_t) ne mogu dovoljno precizno izračunati visoke vrijednosti SSL, što potvrđuju i visoke vrijednosti RMSE i MBE (tablica 5.). Na primjer, kada se radi o veličini predviđanja vrijednosti SSL na stanici 1, jasno je da se vrijednosti SSL koje odgovaraju gotovo ekvivalentnim vrijednostima Q razlikuju po veličini za gotovo 2,5 puta ($Q = 1120, 1150$; $SSL = 10300, 24500$). Taj se trend može uočiti i na drugim stanicama. Modelom M5 u kojem se kao ulazni podaci koriste vrijednosti SSL u t-prvom danu (SSL_{t-1}) može se postići vrlo točna procjena ekstremnih izmjena vrijednosti SSL. To upućuje na prihvatljivost primjene SSL_{t-1} kao ulaznog podatka za prognozu SSL_t . Kao što se može uočiti u tablici 5., svi modeli osim modela M5 donekle podcjenjuju visoke vrijednosti SSL na stanici 2. Vrijednosti su precijenjene u gotovo svim modelima za stanicu 3, a podcijenjene su u modelima M1 i M3 na stanici 4. Rezultati dobiveni pomoću modela SRC jasno pokazuju da se vršne vrijednosti SSL mogu točno procijeniti samo na stanici 2, što se vidi iz veće vrijednosti R^2 , dok takva točnost nije zabilježena na ostalim stanicama. Vrijednost R^2 za model M1 (Q_t) varirala je od 0.23 do 0.7. Vršne vrijednosti SSL na stanici 3 predviđene su prilično dobro pomoću modela M1 gdje je vrijednost R^2 iznosila 0.23, što je isto tako malo kao i vrijednost dobivena pomoću modela SRC. Međutim, modelom M1 dobiveni su relativno prihvatljivi rezultati na drugim stanicama gdje je vrijednost R^2 bila viša od 0,41. Može se zaključiti da se modelom ANFIS povećava točnost rezultata uz ulazne vrijednosti koje odgovaraju onima u modelu SRC.

Tablica 5. Komparativna statistička analiza vršnih vrijednosti SSL u fazi testiranja

Vodomojna stanica	Statistički pokazatelji	Model SRC	Model ANFIS				
			M1	M2	M3	M4	M5
Stanica 1	R ²	0,36	0,42	0,97	0,52	0,31	0,35
	RMSE	7050	5083	1784	4425	5360	5365
	MBE	-2650	-1739	-141	-985	-1249	-1522
Stanica 2	R ²	0,58	0,70	0,84	0,67	0,68	0,93
	RMSE	70	62	55	59	59	40
	MBE	-21	-19	-28	-4	-1	11
Stanica 3	R ²	0,30	0,23	0,68	0,89	0,63	0,98
	RMSE	70183	75061	34763	65167	38361	23705
	MBE	43889	63279	13603	63551	11470	11287
Stanica 4	R ²	0,27	0,41	0,51	0,42	0,55	0,70
	RMSE	2062	2357	2190	1637	1783	1112
	MBE	-186	85	-382	168	-393	-133

3.2. Histereza

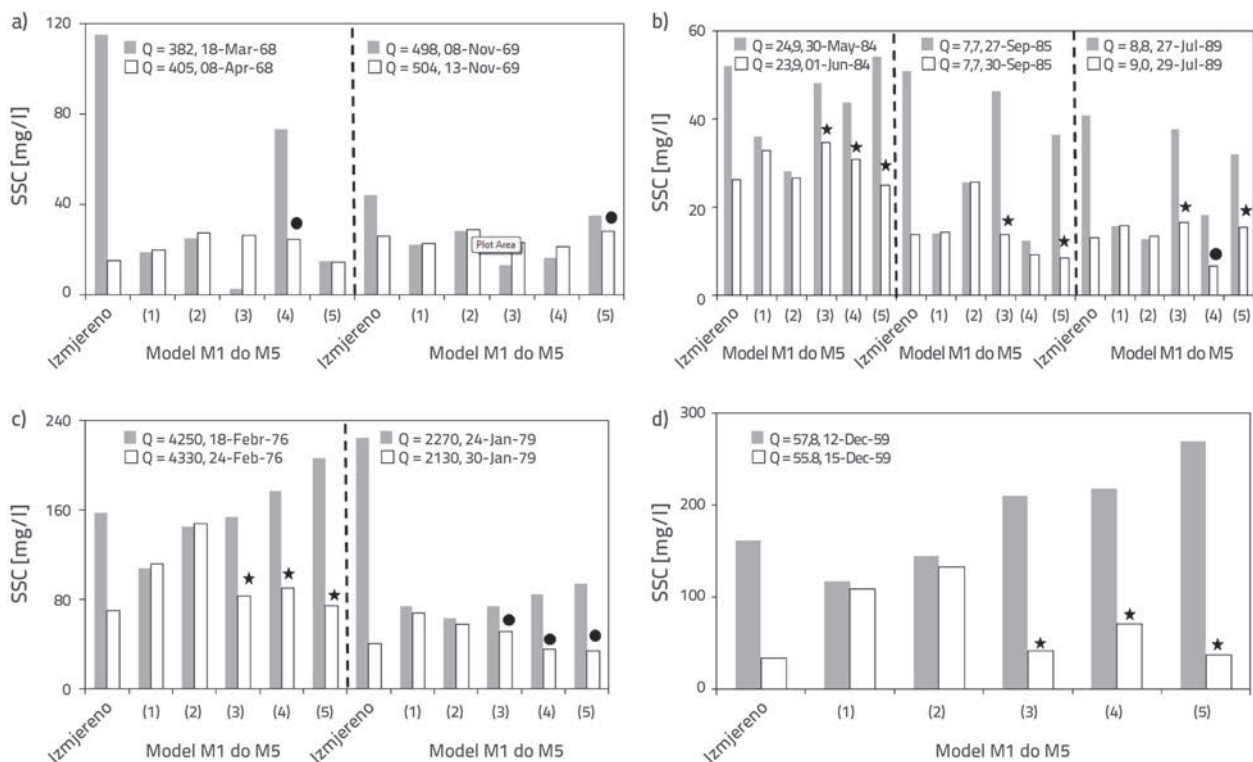
Ponašanje lebdećeg nanosa, te promjene u odzivu SSC-a na događaje padalina-otjecanja, ne ovise samo o uvjetima energije već i o varijacijama u punjenju i pražnjenju korita. Te promjene u dostupnosti nanosa dovode do takozvanog efekta histereze [6]. Kao što je već rečeno, koncentracija nanosa kod dva identična protoka zbog histereze je bila viša u uzlaznom nego u silaznom kraku hidrograma. Koncentracija nanosa može se usporediti kada je protok isti na obje strane hidrograma.

Da bi se istražila točnost simuliranja histereze pomoću modela ANFIS, isti su se modeli koristili za simuliranje nanosa u fazi testiranja na svakoj stanici. Na stanicama od 1 do 4 zabilježena su dva, tri, dva i jedan identičan protok na obje strane hidrograma. Protoci odabrani na dva kraka hidrograma i odgovarajuće vrijednosti SSC prikazani su za četiri stanice na slici 3. Ti su protoci korišteni, zajedno s vrijednostima nanosa, za istraživanje pojave histereze.

Na slici 3. oznaka (*) pokazuje da se radi o realno procijenjenim vrijednostima SSC (tj. značajan interval je reda veličine 10 %), a oznaka (•) pokazuje da su prognozirane vrijednosti SSC na silaznom kraku hidrograma manje od onih na uzlaznom kraku, te da se razlikuju od izmjerenih vrijednosti. Slika 3. pokazuje da su u regresijskom modelu predviđene vrijednosti SSC iste za uzlazni i silazni krak kod jednakog protoka i to zato što vrijednosti SSC rastu uslijed povećanja protoka po zakonu potencije između tih vrijednosti [37]. Kao što se moglo i očekivati, model M1 koji koristi Q_t kao svoju jedinu ulaznu vrijednost nije mogao simulirati tu pojavu na svim stanicama jer je, kao što se vidi u regresijskom modelu, protok zapravo jedini ulazni parametar. Zato se modelom nisu mogli točno simulirati

uvjeti na hidrogramu niti se je moglo uočiti je li zadani protok na uzlaznom ili pak na silaznom kraku hidrograma. Kada se radi o modelu M2, primjena vrijednosti T u svojstvu dodatnog ulaznog parametra nije poboljšala sposobnost predviđanja niti na jednoj od četiri vodomojne stanice jer primjena samo tog parametra u ANFIS-u ne omogućuje određivanje uzlaznih i silaznih krakova na hidrogramu. Regresijskim modelom i modelom M2 obično se za isti protok dobivaju mnogo više predviđene vrijednosti SSC. Stoga rezultati dobiveni na ta dva modela pokazuju da se vrijednosti Q_t i T ne mogu samostalno koristiti za korigiranje histereze pomoću modela ANFIS. Međutim, predviđanje histereze je bilo točnije kada je kao dodatni ulazni parametar korištena vrijednost Q_{t-1} . Stoga je opravdano koristiti vrijednost Q_{t-1} u svojstvu ulaznog parametra za predviđanje vrijednosti SSC. Dobiveni rezultati također pokazuju da se modelom M3 može precizno simulirati histereza na svim stanicama osim na stanici 1 (slika 3.). Ipak, u nekim slučajevima je preciznost bila bitno umanjena kada je prognozirani nanos na silaznom kraku bio uglavnom veći od odgovarajućeg SSC na uzlaznom kraku. Radi usporedbe se na slici 3. prikazuje točnost od 62,5 % (tj. 5 od 8 slučajeva) za predviđanje vrijednosti SSC pomoću modela M3. Može se dakle ustvrditi da se izučeni model M3 ponaša sasvim dobro kada ga usporedimo s modelima M1 i M2.

Može se zaključiti da je uključivanje protoka prethodnog dana (Q_{t-1}) bitno utjecalo na simulaciju histereze pomoću modela ANFIS, jer je tako omogućeno predviđanje protoka i na uzlaznom i na silaznom kraku, što je dovelo do odgovarajuće točnosti predviđanja. Model M4 u kojem su korištene vrijednosti Q_t , Q_{t-1} , T ponašao se u nekim slučajevima bolje od modela M3, ali je njegova točnost ipak u većini slučajeva bila manja. Taj model nije dakle doveo do poboljšanja postupka simulacije. Što se tiče



Slika 3. Usporedba izmjerenih i simuliranih koncentracija nanosa za modele ANFIS: a) stanica 1; b) stanica 2; c) stanica 3; d) stanica 4

modela M5, u kojem je uključen ulazni podatak SSC_{t-1} kao dodatni parametar u odnosu na model M4, njegova učinkovitost je, kao što se vidi na slici 3., sasvim odgovarajuća, iako je na stanici 1 zabilježena nepovoljno niska vrijednost. Stoga se može reći da je model M5 usporediv s modelom M3, ali mu je učinkovitost ipak malo bolja jer je dobra podudarnost utvrđena na šest od osam analiziranih slučajeva velikog protoka.

4. Zaključak

U ovom su radu razvijeni odgovarajući modeli ANFIS i SRC te je obavljena opsežna usporedba izmjerenih vrijednosti SSL primjenom različitih statističkih kriterija. Osim toga, izmjerene i simulirane vrijednosti SSL uspoređene su za različite slučajeve velikog protoka. Za izradu različitih modela služili su podaci prikupljeni na četiri vodomjerne stanice kojima upravlja Geološki institut SAD-a, a koje se nalaze na rijeci Merrimack River kod Lowella, na rijeci Choptanku kod Greensboroa, na rijeci Susquehanna kod Harrisburga te na potoku Swatara kod Harper Taverna. Optimalni model ANFIS razvijen je nakon ispitivanja različitih struktura temeljenih na vrsti i broju funkcija pripadnosti. Zatim su izrađeni modeli ANFIS s različitim parametarskim postavkama. Usvojene su tri standardne statističke mjere kako bi se ocijenila učinkovitost različitih modela razvijenih u ovom istraživanju. Rezultati dobiveni pomoću ANFIS-a uspoređeni su s rezultatima modela SRC.

Kako je za sve četiri vodomjerne stanice postignuta niska vrijednost R^2 , zaključeno je da se protok baziran isključivo na $t -$

danu (model M1) ne može koristiti za precizno prognoziranje vrijednosti SSL pomoću modela ANFIS, te da je postupak SRC prikladniji od modela M1 u fazama ispitivanja. Nakon analize pet različitih kombinacija modela ANFIS, utvrđeno je da parametar T i antecedentni protok (Q_{t-1}) povećavaju točnost u predviđanju vrijednosti SSL. Na osnovi postignutih rezultata može se dodatno zaključiti da je u fazi testiranja najznačajniji faktor bio uvođenje najnovijeg antecedenta SSL (SSC_{t-1}) u svrhu poboljšanja simulacije pomoću ANFIS-a. Najbolja ANFIS-ova kombinacija (model M5) omogućila je značajno poboljšanje učinkovitosti modela u odnosu na regresijski model. Modelom M5 vrijednost SSL simulirana je prikladno i dovoljno točno. Vrijednosti R^2 utvrđene za model M5 varirale su od 0,92 do 0,96 za niz podataka za izučavanje, tj. od 0,86 do 0,95 za niz podataka za testiranje, a najveća vrijednost R^2 dobivena je na vodomjernoj stanici 2.

Da bi se omogućila primjena odzivnih vrijednosti modela ANFIS za predviđanje vršnih nizova podataka o nanosu, te su odzivne vrijednosti u sljedećem koraku uspoređene u fazi testiranja s predviđenim vrijednostima za sve stanice. Na tri od četiri stanice vrijednosti RMSE i MBE dobivene na modelu M1 bile su veće od odgovarajućih vrijednosti zabilježenih na drugim modelima. Značajno poboljšanje u točnosti predviđanja postignuto je kada je parametar T zajedno sa Q_t uključen u matricu ulaznih podataka. Međutim, učinkovitost modela je umanjena dodavanjem parametra T ulaznim vrijednostima Q_t i Q_{t-1} . Utvrđeno je da je uvođenje parametra T pridonijelo točnosti u predviđanju maksimalnih vrijednosti SSC samo kada u ulaznim

vrijednostima nije bilo antecedenta protoka (Q_{t-1}). S druge strane, kada su kao ulazni podaci korišteni Q_{t-1} i SSL_{t-1} zajedno s Q_t , parametar T nije imao utjecaj na poboljšanje modela. Nakon analize rezultata, model M5 s vrijednostima Q_t , Q_{t-1} i SSL_{t-1} odabran je kao najbolji za prognoziranje na stanicama 2, 3 i 4. Provedena je i dodatna analiza da bi se utvrdilo u kojoj mjeri analizirani modeli uzimaju u obzir pojavu histereze. Naša su ispitivanja pokazala da su u regresijskom modelu predviđene vrijednosti SSC iste za uzlazni i silazni krak hidrograma pri jednakom protoku, a razlog tome je primjena zakona potencije između nanosa i protoka. Osim toga, rezultati dobiveni pomoću modela M1 i M3 pokazali su da vrijednosti Q_t i T same za sebe ne omogućuju zadovoljavajuću točnost predviđanja vrijednosti SSC

primjenom modela ANFIS. Nešto točnija simulacija histereze postignuta je primjenom modela M2. Uočeno je da je ulazna varijabla Q_{t-1} najdjelotvorniji faktor za analizu histereznog ponašanja. Ukratko se može reći da se najbolja simulacija histereze u pojedinačnim slučajevima može postići u modelu M5 kada se u model uključi histerežno djelovanje koncentracije nanosa, zajedno s Q_t i Q_{t-1} .

Vizualnim pregledima na bazi grafičke usporedbe izmjerenih i prognoziranih vrijednosti, te kvalitativnom ocjenom modela, konačno je utvrđeno da je model M5 prikladniji od ostalih ANFIS modela i SRC aproksimacija, i to u gotovo svim analiziranim slučajevima nanosa, pri čemu su u obzir uzimane vrijednosti dnevnog nanosa, vršnog nanosa i histereze.

LITERATURA

- [1] Syvitski, J.P.M., Burrell, D.C., Skei, J.M.: Fjords: Processes and Products. *Springer-Verlag*: New York, 1987., <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4612-4632-9>
- [2] Campbell, F.B., Bauder H.A.: A rating-curve method for determining silt-discharge of streams, *Transactions, American Geophysical Union*, 21, pp. 603-607, 1940., <http://dx.doi.org/10.1029/TR021i002p00603>
- [3] Walling, D.E.: Suspended sediment and solute response characteristics of the river Exe, Devon: England; In: Davidson Arnott, R. & Nickling, W., editors. *Research in fluvial systems. Norwich Geoabstracts*, pp. 169-197, 1978.
- [4] Jansson, M.B.: Estimating a sediment rating curves of the Reventzon River at Palomo using- logged mean loads within discharge classes, *Journal of Hydrology*, 183, pp. 227-241, 1996., [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02988-5](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(95)02988-5)
- [5] Mossa, J.: Sediment dynamics in the lowermost Mississippi River, *Engineering Geology*, 45, pp. 457-479, 1996., [http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952\(96\)00026-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952(96)00026-9)
- [6] Asselman, N.E.M.: Suspended sediment dynamics in a large drainage basin: the River Rhine, *Hydrological Processes*, 13, pp. 1437-1450, 1999., [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199907\)13:10<1437::AID-HYP821>3.0.CO;2-J](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199907)13:10<1437::AID-HYP821>3.0.CO;2-J)
- [7] Asselman, N.E.M.: Fitting and interpretation of sediment rating curves, *Journal of Hydrology*, 234, pp. 228-248, 2000., [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00253-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00253-5)
- [8] Syvitski, J.P.M., Morehead, M.D.: Estimating river-sediment discharge to the ocean: application to the Eel margin: Northern California, *Marine Geology*, 154, pp.13-28, 1999., [http://dx.doi.org/10.1016/S0025-3227\(98\)00100-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0025-3227(98)00100-5)
- [9] Syvitski, J.P.M., Morehead, M.D., Bahar, D.B., Mulder T.: Estimating fluvial sediment transport the rating parameters, *Water Resources Research*, 36, pp. 2747-2760, 2000., <http://dx.doi.org/10.1029/2000WR900133>
- [10] Morehead, M.D., Syvitski, J.P., Hutton, E. W.H., Peckham, S.D.: Modelling of temporal variability in the flux of sediment from ungauged river basins, *Journal of Global Planetary Change*, 39, pp. 95-110, 2003., [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00019-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00019-5)
- [11] Bradu, D., Mundlak, Y.: Estimation in lognormal linear models, *Journal of the American Statistical Association*, 65, pp. 198-211, 1970., <http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1970.10481074>
- [12] Walling, D.E.: Suspended sediment and solute yields from a small catchment prior to urbanization. In: Gregory, K.J., Walling, D.E. (Eds.), *Fluvial Processes in Instrumented Watersheds. Institute of British Geographers, Special Publication*, 6, pp. 169-192, 1974.
- [13] Tananaev, N.I.: Hysteresis effects of suspended sediment transport in relation to geomorphic conditions and dominant sediment sources in medium and large rivers of Russian Arctic, *Hydrology research*, 46, pp. 232-243, 2013.
- [14] Beschta, R.L.: Conceptual models of sediment transport in streams. In *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*, (eds. Thorne, C.R., Bathurst, J.C., Hey R.D.), Wiley: pp. 387-419, 1987.
- [15] Gurnell, A.M., Fenn, C.R.: Proglacial channel processes. In: *Glaciofluvial Sediment Transfer: An Alpine Perspective* (eds. Gurnell, A.M., Clark, M.J.), Wiley: pp. 423-472, 1987.
- [16] Kronvang, B., Laubel, A., Grant, R.: Suspended sediment and particulate phosphorus transport and delivery pathways in an arable catchment, Gelbaek stream, Denmark, *Hydrological Process*, 11, pp. 627-642, 1997., [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199705\)11:6<627::AID-HYP481>3.0.CO;2-E](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199705)11:6<627::AID-HYP481>3.0.CO;2-E)
- [17] Kisi, O.: Suspended sediment estimation using neuro-fuzzy and neural network approaches, *Hydrological Sciences Journal*, 50, pp. 683-696, 2005.
- [18] Cobaner, M., Unal, B., Kisi, O.: Suspended sediment concentration estimation by an adaptive neuro-fuzzy and neural network approaches using hydro-meteorological data, *Journal of Hydrology*, 367, pp. 52-61, 2009., <http://dx.doi.org/10.1623/hysj.2005.50.4.683>
- [19] Wieprecht, S., Tolossa H.G., Yang, C.T.: A neuro-fuzzy-based modelling approach for sediment transport computation, *Hydrological Sciences Journal*, 58, pp. 587-599, 2013., <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2012.755264>
- [21] Kisi, O., Shiri, J.: River suspended sediment estimation by climatic variables implication: Comparative study among soft computing techniques, *Computers & Geosciences*, 43, pp. 73-82, 2012., <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2012.02.007>

- [21] Kisi, O.: Suspended sediment estimation using neuro- fuzzy and neural network approaches, *Hydrological Sciences Journal*, 50, pp. 683-96, 2005., <http://dx.doi.org/10.1623/hysj.2005.50.4.683>
- [22] Kisi, O., Haktanir, T., Ardiclioglu, M., Ozturk, O., Yalcin, E., Uludag, S.: Adaptive neuro-fuzzy computing technique for suspended sediment estimation, *Advances in Engineering Software*, 40, pp. 438-444, <http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2008.06.004>
- [23] Aytekin, A., Kisi, O.: A genetic programming approach to suspended sediment modelling, *Journal of Hydrology*, 351, pp. 288-298, 2008., <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.005>
- [24] Rajaei, T., Mirbagheri, S.A., Zounemat, Kermani M., Nourani, V.: Daily suspended sediment concentration simulation using ANN and neuro- fuzzy models, *Science of The Total Environment*, 407, pp. 4916-4927, 2009., <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.05.016>
- [25] Yang, C.T., Marsooli, R., Aalami, M.T.: Evaluation of total load sediment transport formulas using ANN, *International Journal of Sediment Research*, 24, pp. 274-286, 2009., [http://dx.doi.org/10.1016/S1001-6279\(10\)60003-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1001-6279(10)60003-0)
- [26] Rajaei, T.: Wavelet ANN combination model for predication of daily suspended sediment load in rivers, *Science of The Total Environment*, 409, pp. 2917-2928, 2011., <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.11.028>
- [27] Jain, S.H.: Modelling river stage-discharge-sediment rating relation using support vector regression, *Hydrology Research*, 43, pp. 851-861, 2012., <http://dx.doi.org/10.2166/nh.2011.101>
- [28] Sadeghpour Haji, M., Mirbagheri, S.A., Javid, A.H., Khezri, M., Najafpour, G.D.: Suspended sediment modelling by SVM and wavelet, *GRAĐEVINAR* 66 (2014) 2, pp. 211-223, doi: 10.14256/JCE.981.2013
- [29] Jang, J.S.R.: ANFIS: adaptive - network - based fuzzy inference system, *Systems, Man and Cybernetics*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 23, pp. 665-685, 1993.
- [30] Drake, J.T.: Communications phase synchronization using the adaptive network fuzzy inference system. *Phd Thesis New Mexico State University Las Cruces: New Mexico; USA, 2000.*
- [31] Takagi, T., Sugeno, M.: Fuzzy identification of systems and its application to modelling and control. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 15, pp. 116-132, 1985.
- [32] Jang, J.S. R, Sun, C.T.: Neuro- fuzzy modelling and control, *Proceedings of the IEEE*, 83, pp. 378-406, 1995., <http://dx.doi.org/10.1109/5.364486>
- [33] Legates, D.R., McCabe, G.J.: Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation, *Water Resources Research*, 35, pp. 233-241, 1999., <http://dx.doi.org/10.1029/1998WR900018>
- [34] Karunanithi, N., Grenney, W.J., Whitley, D., Bovee, K.: Neural networks for river low prediction, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 8, pp. 201-218, 1994., [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(1994\)8:2\(201\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(1994)8:2(201))
- [35] Firat, M., Gungor, M.: Monthly total sediment forecasting using adaptive neuro fuzzy inference system, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 24, pp. 259-270, 2010., <http://dx.doi.org/10.1007/s00477-009-0315-1>
- [36] Wang, P., Linker, L. C.: Improvement of Regression Simulation in Fluvial Sediment Loads. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134, pp. 1527-1531, 2008., [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:10\(1527\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:10(1527))
- [37] Nourani, V., Ozgur, K., Komasi, M.: Two hybrid Artificial Intelligence approaches for modelling rainfall-runoff process, *Journal of Hydrology*, 402, pp. 41-59, 2011., <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.002>