

Dušan Stevanović¹, Maja Pavić², Uroš Mirković³, Nikola Milivojević⁴

PRIPREMA PODATAKA I IZRADA STATISTIČKIH MODELA ZA PRAĆENJE PONAŠANJA BRANA

Rezime:

Statistički modeli se masovno primenju u praćenju ponašanja brana, jer su jednostavniji od fizički zasnovanih numeričkih modela i omogućavaju da se na efikasan način mogu doneti određeni zaključci o ponašanju brane. U okviru ovog rada je dat prikaz razvoja istraživanja u ovoj oblasti, a potom su navedene smernice za uspešno formiranje modela, prikazane kroz faze pripreme podataka i izradu modela. Sprovedenom analizom je prikazan uticaj određenih smernica i preporuka na konačnu ocenu formiranih modela.

Ključne reči: statistički modeli, osmatranje brana, analiza podataka, ponašanje konstrukcije

DATA PREPROCESSING AND CREATION OF STATISTIC MODELS FOR MONITORING THE BEHAVIOR OF DAMS

Summary:

Statistical models are commonly used to monitor dam behavior due to their simplicity compared to physically based numerical models. They efficiently allow conclusions to be drawn regarding dam behavior. This paper presents an overview of research in this field, followed by guidelines for effectively developing such models, detailing phases from data preparation to model creation. The analysis demonstrates how specific guidelines and recommendations influence the final assessment of these models.

Keywords: statistical models, dam health monitoring, data analysis, structural behaviour

¹ Istraživač, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, Srbija, dušan.stevanovic@jcerni.rs

² Vodeći istraživač, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, Srbija, maja.pavic@jcerni.rs

³ Samostalni istraživač, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, Srbija, uros.mirkovic@jcerni.rs

⁴ Vodeći istraživač, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, Srbija, nikola.milivojevic@jcerni.rs

1. UVOD

Statistički modeli, u skladu sa pravilima matematičke statistike, uspostavljaju vezu između pokazatelja ponašanja brane (veličina koje se osmatraju – pomeranja, deformacije, naprezanja i sl.) i pokazatelja koji predstavljaju spoljašnje uticaje koji deluju na konstrukciju. Da bi se utvrdilo da li se brana uobičajeno ponaša, neophodno je izvršiti provere da li se pojedinačne merene vrednosti osmatranih veličina nalaze u granicama očekivanih opsega. Opseg očekivanih vrednosti osmatranih veličina moguće je formirati na osnovu statističke analize rezultata prethodnih merenja. [1], [2], [3] Važno je naglasiti da je primena statističkih modela veoma pogodna za kontrolu tokom eksploatacije brane, posebno majuci u vidu i druge metode, statističko modeliranje pruža relativno laku i brzu izradu i implementaciju modela, a da pri tom ne zahteva prethodno poznavanje geometrije brane, svojstva materijala i reološke karakteristike zemljišta i terena.

Proces statističkog modeliranja je u ovom radu prikazan kroz dve faze, kako bi se na detaljniji način kroz konkretne primere i preporuke u literaturi, ilustrovao značaj svakog od opisanih segmenata za dobijanje kvalitetnog statističkog modela. U radu je pored prikaza i objašnjenja procesa statističkog modeliranja, ilustrovan stepen odstupanja u oceni modela u zavisnosti od odabranog perioda za izradu statističkog modela, kao i u zavisnosti od usvojenih regresora i formirane regresione jednačine.

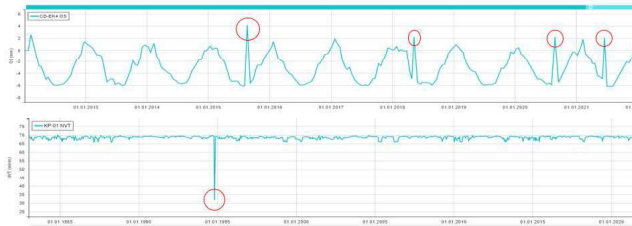
2. PRIPREMA PODATAKA ZA IZRADU MODELA

Proces kreiranja statističkih modela započinje fazom pripreme podataka. Obzirom na činjenicu da kvalitet statističkog modela direktno zavisi od kvaliteta podataka koji se koriste u njegovoj izradi, odnosno koji se modeliraju, od izuzetnog je značaja da se svaki deo faze pripreme podataka odradi kvalitetno.

Pribavljanje podataka merenja za svaku seriju za koju se planira generisanje statističkog modela, dobija se u inženjerskoj praksi najčešće pristupu serveru baze podataka odgovarajućeg sistema za monitoring brane. U okviru sistema za upravljanje bezbednošću brana definišu se podsistemi za upravljanje podacima koji bi na centralizovan način obezbedili akviziciju, arhiviranje i obradu svih podataka dobijenih od strane podsistema za merenje i prikupljanje podataka, sa mogućnošću pregleda i analize podataka.

Prilikom analize kvaliteta dobijenih podataka treba poći od činjenice da je neophodno imati serije koje sadrže veliki broj merenja u neprekidnom vremenskom intervalu, što je uslovljeno tipom serije i učestalošću merenja. U okviru ove faze, prilikom pretrage razmatrane serije merenja, detektuju se merenja čije su vrednosti nerealne ili čak fizički nemoguće (Slika 1).

U slučaju merenja koja se obavljaju ručno, sa manuelnim unosom izmerenih vrednosti u raspoloživu bazu podataka, postoji mogućnost greške prilikom vršenja samih merenja ili prilikom unosa podataka. Unos neregularnih podataka može biti sprečen tako što će sistemski biti omogućen unos samo onih vrednosti koje se nalaze u određenom opsegu. [4] U slučaju da merenje nije očekivano, merenje se može i ponoviti. Naknadno, prilikom pripreme podataka za statističko modeliranje, podaci sa neočekivanim vrednostima se mogu „ručno“ oceniti kao podaci lošeg kvaliteta i izuzeti iz formiranja modela, dok je slučaju merenja koja se obavljaju automatski, najčešće se prilikom uspostavljanja automatske akvizicije vrše određena sistemski podešavanja kojima se odbacuju neregularna merenja. [4]



Slika 1: Primeri neregularnih merenja u okviru vremenskih serija

U okviru faze pripreme podataka pristupa se određivanju perioda na kojem će biti izrađen statistički model. Neophodno je da period bude što duži, odnosno da se raspolaze sa većim fondom podataka. Pored toga, važno je da se u okviru ovog perioda najviše oslanja na podatke iz skorašnjeg perioda sa homogenijom strukturom. [4]

Posebnu pažnju, prilikom analize merenja u fazi pripreme podataka, treba posvetiti prisustvu opadajućeg ili rastućeg trenda, koji će biti objašnjen kroz analizu u poglavlju 5.

3. IZRADA STATISTIČKIH MODELA

Modele koji se razvijaju u cilju praćenja ponašanja brane, na osnovu primenjene tehnike modeliranja autori [2] su predstavili podelu na tri kategorije: numerički, modeli zasnovani na podacima i hibridni modeli. Najprimenljiviji vrsta numeričkih modela svakako su modeli zasnovani na konačnim elementima. Modeli zasnovani na podacima merenja su jako rasprostranjeni u inženjerskoj praksi, ali zahtevaju dobru pokrivenost brane instrumentima za merenja i prikupljanje podataka. Hibridni modeli su najpogodniji u situacijama kada je pristup podacima merenja ograničen iz nekog razloga i ako je potencijalni mehanizam degradacije brane delimično poznat. Tri različite kategorije modela, u zavisnosti od odabrane tehnike modeliranja, modeli zasnovani na podacima privukli su značajnu pažnju poslednjih godina zbog napretka u veštačkoj inteligenciji, ali i efikasnoj primeni statističkih alata u procesu praćenja ponašanja brana. Važno je napomenuti da je glavni nedostatak modela zasnovanog na podacima u odnosu na numerički model, u tome što parametri modela nemaju fizičko značenje. [2]

U radu [2] autori su dali prikaz statističkih modela koji imaju široku primenu i opisali na koji način se izrađuju.

Prvi model za predviđanje pomeranja betonske brane, razvijen je još 60-ih godina prošlog veka, za predviđanje pomeranja betonske brane da bi kasnije bio detaljnije razvijen. Prema HST modelu (Hydrostatic Seasonal Time model) [2,5] odgovor brane (y) se može izraziti sledećom jednačinom u kojoj figurišu: $y = y_H + y_S + y_t + \epsilon$

Na vrednost zavisne promenljive y kojom se izražava HST model utiču 3 promenljive.

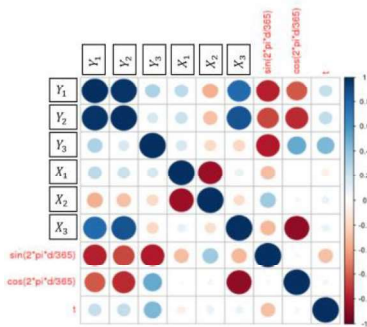
y_H predstavlja hidrostatski pritisak koji nastaje usled pritiska vode iz akumulacije na konstrukciju brane, y_S predstavlja promenljivu sezonskog karaktera i indirektno je povezana sa temperaturom (voda, vazduh ili beton) koja se može predstaviti trigonometrijskim funkcijama. Mora se istaknuti da temperatura nije direktno uvrštena u prethodnom izrazu. y_t predstavlja promenljivu koja je vezana za nepovratne uticaje koji se javljaju usled starenja konstrukcije. Ova pojava se manifestuju kroz efekte puzanja, starenja betona i toplote hidratacije koji su u funkciji vremena. ϵ predstavlja rezidual koji ima značajnu ulogu u proceni ponašanja brane i često se primenjuje kod detekcije vrednosti prekoračenja. [2]

Za razliku od HST modela koji uključuju temperaturne efekte indirektno u proračun, preko sezonskih uticaja, HTT modeli (Hydrostatic Temperature Time model) direktno uključuju temperaturne uticaje na osnovu obavljenih merenja. [2,5] U okviru rada [2] pregledno je izložena literatura različitih autora koji su se bavili uključivanjem temperaturnih uticaja na različite načine. [2] Rezultati pokazuju da su HTT modeli efikasniji od HST modela, posebno na većim nadmorskim visinama, gde je pomeranje brane osetljivije na promene temperature. [2]

Razvijeni su neki drugi modeli, pored HST i HTT modela, kao pokušaji da se nedostaci tradicionalnih modela prevaziđu. U okviru rada [2] je naveden i razvoj HHST modela (Hydraulic Hysteretic Seasonal Time model) i HEST model (Hydraulic Exponential Seasonal Time model). Naglašeno je da prekoračena vrednost deformacije razmatrane brane uzrokovana histerezisnom hidrauličkom deformacijom i efektom pada temperature okoline. Tradicionalni HST model je poboljšan dodavanjem histerezisne hidrauličke komponente y_{H0} , kako bi se ovaj uticaj uvrstio u proračun. HSTT model, slično HST modelu, takođe uzima dnevnu promenu temperature uvođenjem y_T promenljive u jednačinu, jer zbog toplotne inercije često postoji zaostajanje između temperature vazduha i odgovora brane: $y = y_H + y_s + y_t + y_T + \epsilon$. [2]

Prilikom analize profila razmatrane serije, važno je krenuti od sagledavanja tipa meranja koje podrazumeva određivanje fizičke veličine koja je predmet merenja, tipa instrumenta koji se koristi prilikom monitoringa, kao i položaja instrumenta na konstrukciji brane. U proceni koliko određene uzročne serije koje koristimo prilikom modeliranja utiču na razmatranu seriju, može se koristiti matematički pojam korelacije. [6]

Korelisanost između razmatranih i uzročnih serija grafički se može prikazati preko matrice korelacija. [7] Ova matrica predstavlja simetričnu matricu, koja je prikazana na slici 2. Serije koje su predmet modeliranja označane su sa Y_1 , Y_2 i Y_3 . Nakon toga matrica je popunjena uzorčnim serijama (veličinama), na ovoj ilustraciji te veličine su označene sa X_1 , X_2 i X_3 . Obzirom da je vrlo često reč o serijama merenja koje imaju sezonskih karakter, dodate su periodične matematičke funkcije sinusa i kosinusa, dok je na samom kraju dodata vremenska funkcija. Vremenska funkcija predstavlja računski generisanu vremensku seriju sa linearnim vrednostima u vremenu, usled potrebe za preciznijim opisom ulazno ili silaznog trenda. Sa desne strane je izložena skala, na kojoj je prikazana promena po bojama koeficijenta korelacije koja prati promenu vrednosti u opsegu od $[-1,1]$. Jačina boje i veličina krugova koji predstavljaju grafički indikator koeficijenta korelacije se razlikuju, upoređujući različite elemente matrice korelacije.



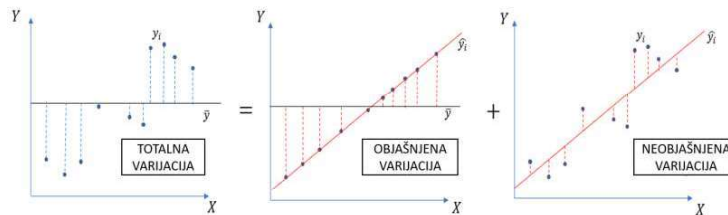
Slika 2: Matrica korelacije

Nakon pozitivne analize profila izabrane (predmetne) serije sa potencijalnim uzročnim serijama, pristupa se određivanju potencijalnih oblika jednačine statističkog modela. Pre svega potrebno je krenuti od određivanja regresora i formiranja regresione jednačine. U ovoj fazi mogu se koristiti različite metode matematičke statistike, ali je najprimenljivija metoda višestruke linearne regresije. [3] Nakon toga se prelazi na ocenu modela i određivanje koeficijenata uz regresore.

Statistički model se u pojedinim slučajevima može opisati jednostavnom regresionom jednačinom u kojoj figuriše samo jedna uzročna serija X_1 ima sledeći oblik jednačine: $Y = A_0 + A_1 \cdot X_1$. Polazna tačka uvek mogu biti modeli koji sadrže samo jednu uzročnu veličinu i onda je poželjno kretati se ka kompleksnijim oblicima, povećavajući broj uzročnih veličina.

Prilikom izrade statističkih modela, glavno merilo kvaliteta je njegova ocena. U literaturi se sreću različite metodologije koje se primenjuju u inženjerskoj praksi. Jedna od najrasprostranjenijih ocena je korigovani koeficijent determinisanosti ili R^2 . [3]

Na slici 3. mogu se videti prikazani pojmovi totalne, objašnjene i neobjašnjene varijacije. Na grafiku je dat prikaz pojedinačnih merenja na ordinati označenih sa y_i , parametar \bar{y} predstavlja srednju vrednost merenja, dok parametar \hat{y}_i predstavlja vrednosti procenjenog regresionog modela. Razlika, odnosno odstupanje između empirijskih merenja i usrednjene vrednosti čitavog fonda merenja predstavlja totalnu varijaciju. Totalna varijacija predstavlja zbir objašnjene i neobjašnjene varijacije. Objasnjena varijacija predstavlja odstupanja procenjenih vrednosti od usrednjene vrednosti merenja, dok neobjašnjena varijacija predstavlja odstupanja procenjenih vrednosti od stvarnih (empirijskih merenja).



Slika 3: Ilustracija pojmova: totalne, objašnjene i neobjašnjene varijacije

Totalnu (V_T), objašnjenu (V_O) i neobjašnjenu varijaciju (V_N) formulišemo sledećim izrazima:

$$V_T = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n} \quad V_O = \sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{n} \quad V_N = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}$$

Koeficijent determinacije možemo definisati putem sledećeg izraza: $R^2 = 1 - \frac{V_N}{V_T}$.

Koeficijentom determinacije R^2 merimo udeo neobjašnjenih varijacija u okviru totalne varijacije. Što je vrednost R^2 bliža jedinici, parametar $\frac{V_N}{V_T} \rightarrow 0$, samim tim se izvodi zaključak da je udeo neobjašnjenih varijacija u totalnoj varijaciji izuzetno mali, odnosno da su vrednosti $y_i \approx \hat{y}_i$, što se na grafiku ilustruje položajem svakog pojedinačnog merenja na regresionoj liniji.

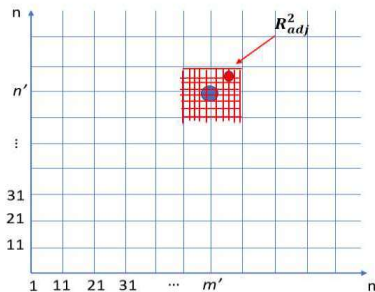
R_{adj}^2 u literaturi [6] predstavlja korigovani koeficijent determinacije, izračunava se na osnovu koef. determinacije, s tim što je korigovan prema broju nezavisnih promenljivih i veličini uzorka. $R_{adj}^2 = 1 - \frac{N-1}{N-k-1}(1 - R^2)$. U izrazu, N predstavlja veličinu uzorka, dok k predstavlja broj nezavisnih promenljivih. Neophodno je naglasiti da u slučaju statističkog modeliranja kod ovakvih vremenskih serija, u kontekstu primene prilikom osmatranja brana, raspolaze se brojem

podataka koji je, najčešće, mnogostruko veći od broja članova regresione jednačine ($N \gg k$). Samim tim se može očekivati da je $R_{adj}^2 \approx R^2$.

4. SPROVEDENA STATISTIČKA ANALIZA

U okviru ovog rada izvršena je analiza u kojoj meri određeni segmenti iz faze pripreme podataka i izrade modela utiču na konačnu ocenu formiranog modela. U okviru faze pripreme podataka pažnja je posvećena: uticaju neregularnih vrednosti i uticaju trenda merenja na konačni model, odnosno važnosti odabira najoptimalnijeg perioda za izradu modela kroz primere. Drugi deo analize posvećen je segmentima u okviru samog procesa modeliranja, koji se odnose na uticaj odabranih regresora i oblika jednačine.

Prilikom izrade modela u ovom radu primenjeni su modeli koji utiče temperature direktno uključuju na osnovu obavljenih merenja temperature vazduha. Pored toga, kao uzročne serije korišćene su vremenske serije: nivoa vode u akumulaciji, kote donje vode i lokalne količine padavina. Prilikom izrade i ocene modela, za potrebe ovog rada korišćen je softver čiji je rad zasnovan na upoređivanju više različitih generisanih modela sa istom regresionom jednačinom, variranjem koeficijenata uz regresore i odabirom najkvalitetnijeg modela, odnosno onog koji se u tom procesu pokaže sa najvećim R^2 . Seriju temperature vazduha (T_{vaz}) prilikom primene kod betonskih brana neophodno modifikovati primenom parametara usrednjavanja i vremenskog izmeštanja, zato što se uticaji promene temperature na konstrukciju betonske brane manifestuju uz kašnjenje i do par meseci. Definisani su parametri m i n , koji predstavljaju respektivno, usrednjavanje tokom određenog perioda i vremensko izmeštanje.

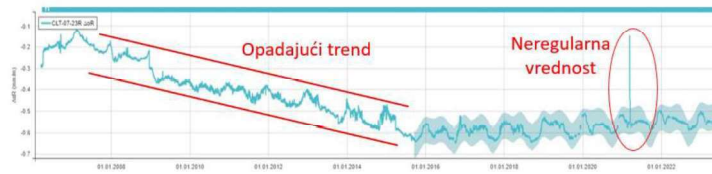


Slika 4: Ilustracija odabira najoptimalnijeg modela u okviru korišćenog softvera

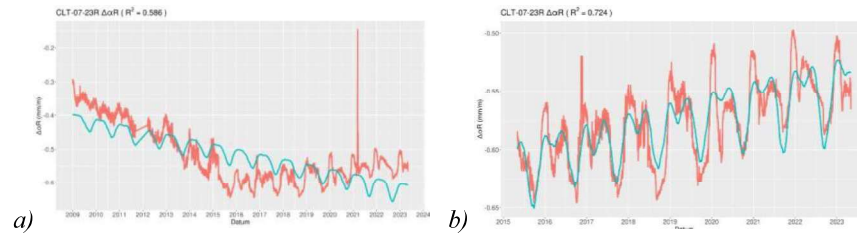
U prvom krugu prolaska kroz softver model je generisan za sve kombinacije parametara (m,n) – plava podela na grafiku (Slika 4). Kombinacija parametara $[m,n]$ za koje je koeficijent R^2 bio najveći (presek je predstavljen plavim krugom na grafiku) je korišćena za naredni krug pretraživanja – crvena podela. Vrednosti parametara u narednom krugu pretraživanja označavamo sa m' i n' .

U drugom prolasku kroz softver model je generisan za sve kombinacije parametara (m,n) , pri čemu je parametar m uzimao vrednosti $[m'-10, m'-9, \dots, m', m'+1, \dots, m'+10]$ a parametar n je uzimao vrednosti iz intervala $[n'-10, n'-9, \dots, n', n'+1, \dots, n'+10]$. Odabrana je kombinacija parametara za koje je koeficijent R^2 bio najveći, odnosno te vrednosti parametara su proglašene za najoptimalnije za razmatrani model (presek je predstavljen crvenim krugom na grafiku).

Analiza važnosti perioda za generisanje modela na serijama na kojima je uočljivo postojanje opadajućeg trenda u merenjima može se ilustrovati na primeru promene nagiba u radijalnom pravcu na prelivnoj lameli. Na slici 5. je prikazana kompletna vremenska serija. Za potrebe rada, generisan je model na kompletnoj seriji i na periodu nakon opadajućeg trenda (Slika 6), kako bi se za istu regresionu jednačinu ilustrovala razlika u ocenama krajnjih modela.



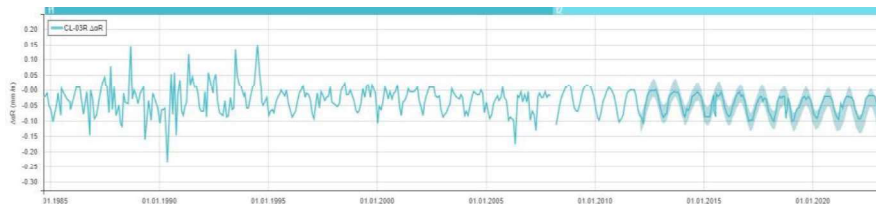
Slika 5: Vremenska serija sa prisustvom opadajućeg trenda u merenjima



Slika 6: Formiran model na celom periodu (a) i na periodu nakon opadajućeg trenda u merenjima (b)

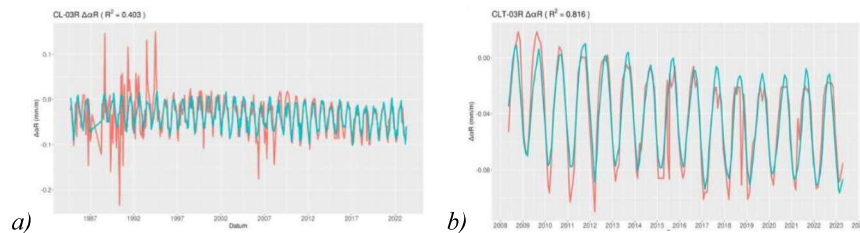
Na slici 6. po prikazanim vrednostima ocena, ali i na osnovu vizuelnog prikaza modela, može se uvideti značaj eliminisanja opadajućeg trenda. Važno je naglasiti da drugi model pored optimalnijeg perioda za generisanje, poboljšan i isključivanjem neregularnih vrednosti, izmerenih početkom 2021. Ukoliko se pristupi modeliranju bez otklanjanja tih vrednosti $R^2 = 0.631$, dok je eliminisanjem tih merenja $R^2 = 0.724$, što predstavlja značajno poboljšanje. Neophodno je istaći, da će serije koje uvrštavaju opadajući trend i neregularna merenja, u potencijalnoj upotrebi, brže zahtevati recalibraciju od najoptimalnijeg prikazanog modela.

Pored prisustva trenda i neregularnih vrednosti merenja koje su obrađene u prethodnom primeru, važno je naglasiti da se tokom procesa osmatranja mogu javiti na pojedinim mernim mestima izmenjeni profili merenih veličina, na koje mogu uticati različiti faktori. U primeru serije koja je prikazana na slici 7. postoji kontinuitet merenja od 80-ih godina prošlog veka, ali je tokom vremena došlo do zamene mernog instrumenta i to je rezultiralo promenu prirode merenja od 2008. godine.



Slika 7: Uticaj promene tipa mernog instrumenta na promenu profila vremenske serije

Kada se formira model na čitavom periodu, sa svim raspoloživim podacima merenja, postojanje dva različita profila merenja odraziće se izrazito negativno na ocenu modela. Na slici 8. prikazan je prvo statistički model za ceo period (ocena $R^2 = 0.403$), a nakon toga i za period od 2008. do 2023 sa podacima nakon promene mernog instrumenta (ocena $R^2 = 0.816$). Različiti profili merenja u okviru iste serije drastično utiču na kvalitet modela, pa ukoliko se u proces izrade statističkog modela pristupi na nehomogenom periodu, može se očekivati model sa duplo gorim performansama.



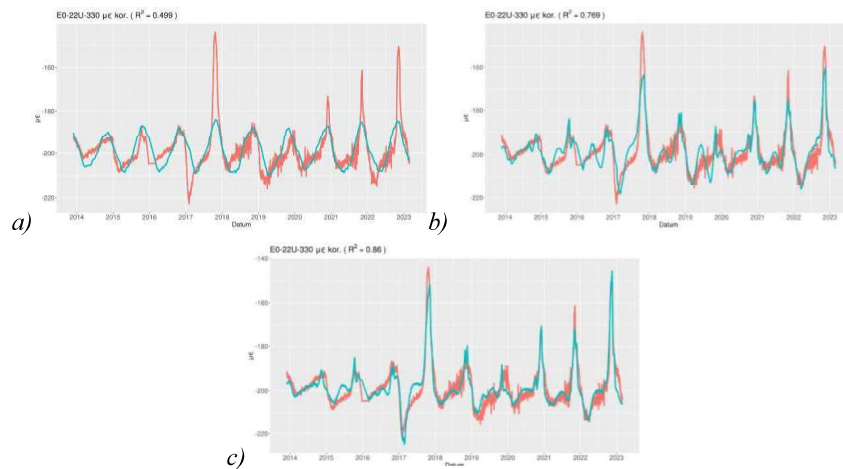
Slika 8: Formiran model na celom periodu (a) i na periodu nakon promene mernog instrumenta (b)

Analiza važnosti izbora regresione jednačine biće ilustrovana na primerima u kojima se modeli kreiraju na istom periodu, kako bi se eliminisao potencijalni uticaj faktora iz faze pripreme podataka na ocenu i izgled modela.

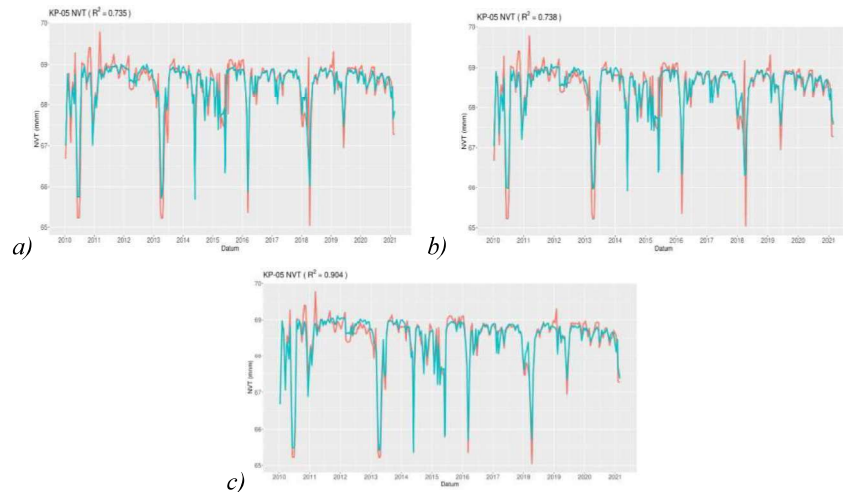
Kao početni model izrađen je model prvog stepena u kojem su figurisale obe uzročne serije: temperatura vazduha i nivo vode u akumulaciji $Y = A_0 + A_1 \cdot Tvaz(n, m) + A_2 \cdot NVA$. Zbog velikih pikova u vrednostima koji su karakteristika u pojedinim sezonskim varijacijama, ovaj oblik jednačine statističkog modela nedovoljno dobro opisuje pikove, ali sa odabranim regresorima prilično dobro opisuje profil serije. Ocena ovog modela $R^2 = 0.499$ (Slika 9 gore levo). Zatim je formiran model istim uzročnim serijama, ali sa složenijom jednačinom, polinomom drugog stepena. Sudeći po oceni modela $R^2 = 0.769$ i njegovom izgledu (Slika 9 desno), jasno je uočljivo da pored profila serije, složeniji oblik jednačine bolje opisuje i prisutne pikove u merenjima. Za potrebe analize u okviru rada, na istom periodu, je formiran model sa polinomom trećeg stepena. Značajno poboljšanje ocene modela $R^2 = 0.860$ i bolje opisivanje ekstremnih vrednosti ovim modelom (Slika 9), opravdava korišćenje složenije jednačine statističkog modela. Treba naglasiti da usled određenih promena tendencije u vrednostima merenja, implementirani modeli višeg stepena će brže pokazati potrebu za rekalkibracijom, te stoga treba razmišljati o racionalnosti njihove primene i pored veće tačnosti i boljoj oceni nakon samog procesa modeliranja.

Kako kvalitet statističkog modela i njegova ocena ne moraju biti drastično poboljšani usloznavanjem oblika jednačine, pogodno je ilustrovati na sledećem primeru. Serija merenja je imala u okviru analize jednu uzročnu serije (nivo vode u akumulaciji), koji je sadržao parametre m i n . Na istom periodu, koji je određen nakon preprocesiranja podataka, formirana su 3 različita modela, koja se razlikuju na osnovu oblika regresione jednačine. Ocene, kao i izgled modela se preterano ne razlikuju i nije uočeno poboljšanje kao u prethodnom primeru povećavanjem stepena polinoma. Ocena je neznatno povećana, dok su ekstremne vrednosti modelima opisane na sličan način. Ukoliko se formira još složenija jednačina, trećim stepenom polinoma $Y = A_0 + A_1 \cdot NVA(n, m) + A_2 \cdot NVA^2(n, m) + A_3 \cdot NVA^3(n, m) + A_4 \cdot t$, dobija se znatno kvalitetniji model od prethodna dva (Slika 10). Na osnovu ocene i izgleda modela, opisivanjem ekstremnih

vrednosti merenja, model sa trećim stepenom je spremniji za implementaciju. Za razliku od prethodnog primera možemo konstatovati da je neuporedivo bolja ocena i veća tačnost postignuta prelaskom sa modela sa jednačinom polinoma drugog stepena na model sa jednačinom polinoma trećeg stepena.



Slika 9: Formirani modeli sa polinomom prvog (levo) i drugog stepena (desno)



Slika 10: Formirani modeli sa polinomom prvog (a), drugog (b) i trećeg stepena (c)

5. ZAKLJUČAK

Izloženim smernicama u okviru ovog rada sa sprovedenom analizom i uvidom u ocene formiranih statističkih modela, prikazan je značaj temeljnog pristupa svakoj fazi u procesu izrade

modela. Analitički pristup u fazi pripreme podataka, eliminacija ili umanjeње efekata trenda u merenjima i odstranjivanje neregularnih vrednosti merenja, značajno će unaprediti performanse modela. Podjednako važno, za povećanje performansi modela, je i faza izrade modela. U radu je prikazan značaj određivanja korelacije modeliranih serija i uzročnih veličina, kao početnog koraka u modeliranju i pravog smera za odabir najoptimalnije regresione jednačine.

Važno je istaknuti, kao što je i u sprovedenoj analizi prikazano, da kvalitet modela nije uvek uslovljen složenošću regresione jednačine. U inženjerskoj praksi, dešava se da određeni statistički modeli, ne mogu biti upotrebljeni u praktične svrhe, jer bi vrlo brzo neopravdano ukazivali na neočekivano ponašanje brane. Neophodno je skrenuti pažnju na proces verifikacije kao važnog segmenta koji prethodi implementaciji modela. Verifikacijom formiranih modela stiče se kompletna slika o osetljivosti modela i dobija šira slika o mogućnosti njegove realne primene u praćenju ponašanja brana.

LITERATURA

- [1] B. Li, J. Yang, D. Hu, „Dam monitoring data analysis methods: A literature review“, *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 27, issue 3, 2020, doi: 10.1002/stc.2501.
- [2] G. Prakash, R. Dugalam, M. Barbosh, A. Sadhu, „Recent advancement of concrete dam health monitoring technology: A systematic literature review, *Structures*, vol. 44, pp. 766-784, 2022, doi: 10.1016/j.istruc.2022.08.021.
- [3] M. Bühlmann, „Statistical Methods for Dam Behaviour Analysis“, PhD thesis, ETH Zürich 2018, doi: 10.3929/ethz-b-000480439.
- [4] Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi” Beograd, Studija o pravnim, ekonomskim, tehničkim i bezbednosnim aspektima upravljanja visokim branama u Srbiji, Knjiga 4: Izveštaj o kriterijumima i koncepciji upravljanja bezbednošću brana, Beograd, 2024
- [5] Salazar F, Morán R, Toledo M.A, Oñate E, Data – Based Models for the Prediction of Dam Behaviour: A Review and Some Methodological Considerations, *Archives of Computational Methods in Engineering*, Springer, 2017, Vol. 24, 1-21, doi: 10.1007/s11831-015-9157-9
- [6] Kottegoda N.T, Rosso R, *Applied Statistics for Civil and Environmental Engineers*, Wiley-Blackwell, 2nd edition, 2008
- [7] Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi” Beograd, Sistem za upravljanje bezbednošću brane HE „Đerdap 1“ Verzija 2022, Knjiga 4: Izveštaj o izmenama i dopunama dokumentacije SUB HE „Đerdap 1“ 2020, Beograd, 2023

Društvo građevinskih konstruktora Srbije - Međunarodni Simpozijum

18 - 20. 09. 2024.
VRNJAČKA BANJA



ZBORNİK RADOVA SA NACIONALNOG SIMPOZIЈUMA

U SARADNJI SA



POKROVITELЈI



Република Србија
МИНИСТАРСТВО НАУКЕ,
ТЕХНОЛОШКОГ РАЗВОЈА И ИНОВАЦИЈА



Инжењерска
комора
Србије

PLATINASTI SPONZORI

PUT INŽENJERING

ŠIRBEGOVIĆ®
INŽENJERING



ZLATNI SPONZORI



delta
inženjering



CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

624(082)(0.034.2)
69(082)(0.034.2)

ДРУШТВО грађевинских конструктора Србије. Међународни симпозијум (2024 ;
Врњачка Бања)

Zbornik radova sa Nacionalnog simpozijuma ДГКК [Elektronski izvor] / Društvo
građevinskih konstruktora Srbije, Međunarodni simpozijum, 18-20.09.2024., Vrnjačka Banja ;
[urednici Zlatko Marković, Jelena Dobrić, Vladimir Vukobratović]. - Beograd : Univerzitet,
Građevinski fakultet : Društvo građevinskih konstruktora Srbije, 2024 (Beograd : Univerzitet,
Građevinski fakultet). - 1 USB fleš memorija ; 1 x 2 x 7 cm
Sistemska zahteva: Nisu navedeni. - Nasl. sa naslovne strane dokumenta. - Radovi na srp. i
engl. jeziku. - Tiraž 300. - Bibliografija uz svaki rad. - Summaries.

ISBN 978-86-7518-247-4 (GF)

а) Грађевинарство -- Зборници
COBISS.SR-ID 151617289

Izdavač:	Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73/1
Suizdavač:	Društvo građevinskih konstruktora Srbije Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73
Urednici:	prof. dr Zlatko Marković prof. dr Jelena Dobrić v. prof. dr Vladimir Vukobratović
Recenzenti:	Naučni odbor Simpozijuma 2024
Tehnička priprema:	doc. dr Nina Gluhović doc. dr Marija Todorović doc. dr Isidora Jakovljević
Grafički dizajn:	Tijana Jovović
Dizajn korica:	Luka Pavelka

ZBORNIK RADOVA izlazi u elektronskom obliku na USB

Ustanova koja vrši umnožavanje na USB: Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet

Broj kopija na USB: 1

Broj USB: 300

Beograd, septembar 2024.