

PAMETNI MONITORING I ZAŠTITA VODNIH RESURSA U BIH: PROJEKTNI OKVIR ZA INTEGRACIJU PODATAKA, AI ANALITIKU I OPERATIVNE PROTOKOLE / SMART MONITORING AND PROTECTION OF WATER RESOURCES IN BOSNIA AND HERZEGOVINA: A PROJECT FRAMEWORK FOR DATA INTEGRATION, AI ANALYTICS, AND OPERATIONAL PROTOCOLS

Doc.dr. Nešad Krnjić¹, Rudolf Petrušić², MA, Doc.dr. Nedžada Tolja²

¹Sveučilište „Vitez“, ul. „Školska“ br. 7, 72270 Travnik, BiH,

²Internacionalni univerzitet Travnik, Aleja konzula – Meljanac bb, 72270 Travnik, BiH,
e-mail: prof.nesad@gmail.com, rudolf.petrusic@iu-travnik.com, nedzada.tolja@iu-travnik.com

Pregledni članak

<https://www.doi.org/10.58952/zr20251402040>

UDK / UDC 628.1:004.8:005.8(497.6)

Sažetak

Rad predlaže projektni okvir za unapređenje monitoringa i zaštite vodnih resursa u Bosni i Hercegovini, bez novih terenskih mjerenja. Rješenje se oslanja na tri stuba: (1) integrisano „jezero podataka“ koje objedinjuje postojeće laboratorijske nalaze, historijske serije i administrativne evidencije, uz standardizovane metapodatke i protokole razmjene; (2) analitički sloj za detekciju anomalija i procjenu rizika, razvijen na sekundarnim podacima i potpomognut vještačkom inteligencijom (eng. Artificial Intelligence, AI) i objašnjivom vještačkom inteligencijom (eng. Explainable Artificial Intelligence, XAI) radi transparentnog tumačenja alarma; te (3) operativne protokole – eskalacione lance, pragove upozorenja i vremena reakcije prema sporazumu o nivou usluge (eng. Service Level Agreement, SLA) – koji povezuju nalaze analitike s nadležnim institucijama. Očekivani doprinos je smanjenje fragmentacije, brža reakcija na zagađenja i jasan plan kasnije fizičke nadogradnje (uključujući na primjer internet stvari – eng. Internet of Things, IoT).

Ključne riječi: kvalitet voda, upravljanje podacima, vještačka inteligencija, rani alarmi.

JEL klasifikacija: Q25; Q53; Q58; O33; L95.

Abstract

This paper proposes a project framework to improve the monitoring and protection of water resources in Bosnia and Herzegovina without new field measurements. The solution rests on three pillars: (1) an integrated data lake that consolidates existing laboratory results, historical time series, and administrative records, supported by standardized metadata and exchange protocols; (2) an analytics layer for anomaly detection and risk assessment developed over secondary data and powered by Artificial Intelligence (AI) and Explainable Artificial Intelligence (XAI) to provide transparent interpretation of alerts; and (3) operational procedures - escalation chains, warning thresholds, and response times governed by a Service Level Agreement (SLA) - that connect analytical findings to competent institutions. The expected contribution is reduced fragmentation, faster response to pollution events, and a clear roadmap for later physical upgrades (including the Internet of Things (IoT)).

Keywords: water quality, data governance, artificial intelligence, early warning.

JEL Classification: Q25; Q53; Q58; O33; L95.

UVOD

Očuvanje vodnih resursa preduslov je javnog zdravlja, ekoloških dobrobiti za čovjeka - tzv. usluga prirodnih ekosistema, poput filtriranja vode i ublažavanja poplava - te održivog razvoja. U Bosni i Hercegovini se monitoring kvaliteta voda oslanja na fragmentirane izvore podataka i periodične analize, što otežava ranu detekciju zagađenja i koordinisano djelovanje nadležnih institucija. Istovremeno, dostupnost historijskih i laboratorijskih podataka, kao i administrativnih evidencija, otvara prostor za unapređenje sistema bez neposrednih novih terenskih mjerenja. Evropski regulatorni i interoperabilni okviri – poput Okvirne direktive o vodama (eng. Water Framework Directive, WFD) već decenijama insistiraju na jednoobraznim metapodacima, sljedivosti podataka i standardizovanim razmjenama (European Parliament & Council, 2000; European Commission, 2007). U nastavku iznosimo projektni okvir koji integriše postojeće podatke u „jezero podataka“, uvodi analitički sloj za detekciju anomalija i procjenu rizika uz podršku vještačke inteligencije i objašnjive vještačke inteligencije, te uspostavlja operativne protokole (eskalacioni lanci, pragovi upozorenja i vremena reakcije po sporazumu o nivou usluge) koji povezuju nalaze analitike s odgovornim akterima. Cilj je smanjiti vremenski jaz između nastanka incidenta i institucionalne reakcije, povećati transparentnost kroz javne nadzorne panele i pripremiti teren za buduće fizičko proširenje (npr. senzorske mreže). Ovaj rad predlaže projekat koji objedinjuje sekundarne izvore (laboratorije, hidro-meteorološke serije, administrativne i operativne zapise) i uvodi ih u integrisano skladište vremenskih serija i katalog skupova, uz kontrolisane rječnike i programski interfejs aplikacije. Analitički sloj kombinuje robustnu statistiku i modele detekcije anomalija s objašnjivim AI izlazima, a operativni dio uvodi INFO/WARN/ALERT protokole i odgovarajuće rokove prema sporazumu o nivou usluge. Time se skraćuje vrijeme „od sumnje do potvrde i intervencije“, uz usklađenost s evropskim standardima (OGC SensorThings; ISO 19115; DCAT-AP) i kasniji „plug-in“ priključak senzorskih mreža (OGC, n.d.; ISO, 2014; European Commission, 2024).

1. KONTEKST I PROBLEM U BOSNI I HERCEGOVINI

Podaci o kvalitetu voda nastaju u različitim institucijama: od hidro-meteoroloških zavoda i zavoda za javno zdravlje, do komunalnih preduzeća i inspekcija - ali su često razvučeni po formatima, standardima i učestalosti prikupljanja. U praksi to znači da je pravovremeno prepoznavanje zagađenja otežano, a institucionalna reakcija kasni ili se oslanja na ad-hoc razmjenu informacija. Dodatni izazovi su neredovna serijska mjerenja, ograničeni metapodaci (npr. koordinate, metodologija, status validacije), kao i nedovoljno jasni protokoli: ko potvrđuje alarm, u kojem roku, kojim redoslijedom obavještava nadležne i kako se dokumentuje odgovor. U takvom okruženju, i kada podataka ima, nedostaje „spojno tkivo“ - interoperabilna šema i dogovoreni protokoli - koje bi postojeću evidenciju pretvorili u operativnu informaciju za odluku i akciju. Predloženi projektni okvir polazi od ove realnosti: ne uvodi nova terenska mjerenja, nego osmišljava kako da se ono što već postoji dovede u zajedničku formu, analitički obradi i procedurama poveže s odgovornim akterima kao što su: entitetska i kantonalna ministarstva te agencije za vode, hidro-meteorološki zavodi, zavodi za javno zdravlje i akreditovane laboratorije, komunalna preduzeća, inspeksijske službe, općinske službe, univerziteti, nevladine organizacije i privredni subjekti.

1.1. IZVORI I VRSTE PODATAKA

Podaci o vodama u BiH već postoje u brojnim razdvojenim evidencijama i formiraju mozaik koji je moguće objediniti bez novih mjerenja. Tu imamo nekoliko važnih kategorija:

Laboratorijski nalazi kvaliteta vode. Hemijski (npr. pH, električna provodljivost, amonijak, nitrati, fosfati, teški metali), mikrobiološki (E. coli, koliformne bakterije) i fizikalni pokazatelji (zamućenost, temperatura). Uz svaki nalaz važni su metapodaci: metoda analize, granica detekcije, datum i vrijeme, lokacija/koordinate, status validacije.

Hidrološki i meteorološki skupovi. Vodostaj, protok, padavine, temperatura zraka – sve su to serije koje objašnjavaju prirodnu dinamiku i pomažu da se odvoje "hidrološki uzroci" od potencijalnih zagađenja.

Administrativne i regulatorne evidencije. Dozvole za ispuštanje, inspekcijski zapisnici, prijave incidenata, prekršajne i kaznene mjere. Ovi podaci povezuju analitiku sa odgovornošću i postupcima.

Operativne evidencije komunalnih preduzeća i postrojenja. Rad pumpnih stanica i prečistača, planirani i neplanirani ispusti, servisni nalozi, kvarovi. Ovdje se često nalaze najraniji tragovi problema.

Projektni i istraživački setovi. Podaci koje su prikupljali univerziteti, zavodi ili nevladine organizacije u posebnim studijama. Iako heterogeni, često popunjavaju prostorne ili vremenske "rupe" u službenim serijama.

Svi ovi izvori postaju upotrebljivi tek kada se usaglasе oko minimalnog zajedničkog skupa polja (identifikator tačke, koordinate, parametar, jedinica, metoda, vrijeme, izvor, status validacije) i kada se obezbijedi trag revizije (ko je šta unio, kada i zašto).

1.2. TRENUTNE PRAKSE I NEDOSTATCI

Fragmentacija formata i šema. Podaci stižu u Excelu, CSV-u, PDF-u ili skeniranim izvještajima, bez jedinstvene šeme i kontrolisanih rječnika. Spajanje i poređenje setova traži ručni rad i gubi se konzistentnost.

Neredovnost i kašnjenje. Mnoge tačke se analiziraju periodično (mjesečno, sezonski), pa se incidenti u međuvremenu ne vide. Vremensko obilježavanje nije uvijek u jednoobraznom formatu, što otežava rekonstrukciju događaja.

Nepotpuni metapodaci. Nedostaju koordinate, opis metode, granica detekcije ili status validacije (preliminarno/ovjereno). Bez toga je teško procijeniti pouzdanost i uporedivost.

Slaba interoperabilnost i ograničen pristup. Razmjena podataka odvija se "na zahtjev", često e-poštom, bez standardizovanih programskih interfejsa i bez jasnih pravila o nivou usluge (rok za potvrdu/reakciju).

Neujednačeni protokoli postupanja. Nije svugdje jasno ko prima alarm, ko ga potvrđuje laboratorijski, u kojem roku se obavještavaju operateri i inspekcija, i kako se dokumentuje odgovor.

Regulatorne razlike i operativni raskoraci. Propisi i prakse razlikuju se po entitetima/kantonima; nedostaje zajednički minimum standarda za razmjenu podataka i javno izvještavanje.

Navedene tačke ne zahtijevaju momentalno uvođenje novih senzora: prvo treba "otključati" vrijednost onoga što već postoji - ujednačiti podatke, uspostaviti zajedničku šemu i potporne protokole - kako bi se iz postojećih evidencija izvlačili pravovremeni, provjerljivi i akcijski korisni uvidi.

1.3. ZAHTJEVI ZA CILJNI SISTEM - PROJEKTNI NIVO

Ciljni sistem treba da pretvori postojeće, danas raspršene podatke u pouzdanu osnovu za odluku i akciju, bez uvođenja novih mjerenja u ovoj fazi. Minimalni zahtjevi su:

Interoperabilnost i standardizacija. Jedinstvena šema podataka i metapodataka, kontrolisani rječnici (nazivi parametara, jedinice, statusi), te jasna verzionisanja zapisa.

Kvalitet i provjerljivost. Trag revizije (ko/šta/kada/zašto), oznaka statusa ("preliminarno", "validirano", "korigovano"), prikaz nesigurnosti/tačnosti.

Sigurnost i zaštita podataka. Kontrola pristupa po ulogama, zapis audita, šifriranje u prijenosu i mirovanju; pseudonimizacija gdje postoji osjetljivost.

Programski pristup. Dokumentovani programski interfejs aplikacije (API) za razmjenu i automatizaciju, uz ograničenja protoka i dnevnik poziva.

Operativna spremnost. Definisani pragovi upozorenja, uloge i eskalacioni lanci, te okvirni sporazum o nivou usluge (SLA) za potvrdu i odgovor na alarme.

Transparentnost. Javno dostupan nadzorni panel s agregiranim pokazateljima i objašnjenjima (gdje je moguće u skladu s propisima).

Fazno širenje. Prva faza – integracija i analiza sekundarnih izvora; naredne faze – priključak budućih senzorskih mreža bez promjene logičke arhitekture.

U tabeli 1 su dati minimalni metapodaci za razmjenu i spajanje skupova.

Tabela 1. Minimalni metapodaci za razmjenu i spajanje skupova

Polje (obavezno)	Opis
ID_mjerne_tačke	Jedinstveni identifikator tačke/stanice
Naziv_tačke	Lokalni naziv, vodotok ili objekat
Koordinate_WGS84	Geografska širina/dužina (decimalni format)
Vrsta_vode	Površinska / podzemna / pitka / otpadna
Parametar	Npr. pH, nitrati (NO ₃ ⁻), E. coli, zamućenost
Jedinica	SI jedinica mjere (npr. mg/L, NTU)
Metoda_mjerenja	Standard ili tehnika (skraćeni naziv + referenca)
Granica_detekcije	LOD/LOQ gdje je primjenjivo
Datum_vrijeme	ISO 8601 (lokalno vrijeme)
Izvor/Laboratorija	Naziv institucije ili operatera
Nesigurnost/tačnost	Ako je dostupno (± vrijednost, % ili opis)
Status_validacije	Preliminarno / validirano / korigovano
ID_uzorka/Izveštaja	Referenca na laboratorijski zapis ili izvještaj
Način_prikupljanja	Ručno/automatski; kompozitni/"grab" uzorak
Frekvencija	Dnevno, sedmično, mjesečno, ad-hoc
Pravna_osnova	Dozvola/standard/akt koji se primjenjuje
Kontakt	Tehnička kontakt-tačka (institucija/osoba, e-mail/telefon)

Izvor: vlastiti izvor

1.4. PRETPOSTAVKE I OGRANIČENJA PROJEKTOG PRISTUPA

Pretpostavke

Dovoljna količina i osnovni kvalitet postojećih podataka (historijske serije, laboratorijski izvještaji, administrativne evidencije) da se izgradi početni model i standardizovana šema.

Institucije su spremne na sporazume o razmjeni podataka i usvajanje minimalnih standarda metapodataka.

Tehnički kapaciteti za uspostavu zajedničkog skladišta podataka i programskog interfejsa aplikacije (API) postoje ili se mogu brzo razviti.

Postoji institucionalna volja da se definišu rokovi postupanja i eskalacioni lanci.

Ograničenja

Kvalitet i pokrivenost podataka variraju po entitetima/kantonima; u pojedinim periodima mogu postojati praznine ili nedostatak metapodataka (koordinate, metoda, status validacije).

Neujednačene pravne prakse i organizacijske procedure mogu usporiti standardizaciju i razmjenu.

Bez novih mjerenja, verifikacija alarmâ oslanja se na raspoložive laboratorijske protokole i brzinu institucionalne reakcije.

Procjene učinka sistema u ovoj fazi biće modelne/simulacijske (na historijskim incidentima), a ne eksperimentalne na terenu.

Održavanje i dalje unaprjeđenje zahtijevaju trajnu budžetsku liniju i jasno definisanu nadležnost za upravljanje promjenama.

2. PREGLED LITERATURE I PRAKSI

2.1. STANDARDI I OKVIRI INTEROPERABILNOSTI

Evropski i međunarodni okviri dosljedno naglašavaju da se vrijednost stvara tek kad su podaci interoperabilni, sljedivi i dostupni kroz standardizovane metapodatke i servise. Okvirna direktiva o vodama (WFD) postavlja ciljeve "dobrog stanja" voda i strukturu izvještavanja te podrazumijeva konzistentne parametre i jednoobrazno označavanje vodnih tijela (European Parliament & Council, 2000). INSPIRE standardizuje prostorne podatke, metapodatke i načine objave, čime mjerenja i uzorci postaju prostorno-vremenski jednoznačno referencirani (European Commission [EC], 2007). Za katalogizaciju i objavu skupova široko se koristi DCAT-AP kao profil kataloga podataka (EC, 2024), a za metapodatke geoinformacija referentna je ISO 19115-1 (International Organization for Standardization [ISO], 2014). U domeni vremenskih serija osmatranja ističu se specifikacije OGC SensorThings API i O&M, koje definišu kako opisati i razmjenjivati osmatranja preko web servisa (Open Geospatial Consortium [OGC], n.d.). Očito je da minimalni, ali rigorozno definisan skup metapodataka i otvoreni API omogućavaju da heterogeni izvori postanu operativno upotrebljivi. Implikacija za ovaj rad je: Ne uvodimo pune standarde "u komadu", već kompatibilni minimum: ID mjerne tačke, koordinate (WGS84), parametar i jedinicu, metodu i granicu detekcije, vrijeme (ISO 8601), izvor i status validacije — uz katalog (DCAT-AP-like) i API koji kasnije može rasti prema OGC/INSPIRE/WFD.

2.2. ANALITIČKI PRISTUPI I PRIMJERI PRAKSI

Za projektni nivo bez novih senzora prioritet je robustno iskorištavanje sekundarnih vremenskih serija. Stabilna polazna tačka su statističke procedure: sezonska dekompozicija i analiza reziduala (npr. STL), kontrolne karte i (robustni) z-score pragovi — sve sa jakim osloncem na objašnjivost (Cleveland et al., 1990; Chandola, Banerjee, & Kumar, 2009). Kako bi se uhvatili nelinearni obrasci i kombinacije više indikatora, priključuju se modeli detekcije anomalija poput Isolation Forest-a i, gdje ima smisla, plitki autoenkoderi; u praksi se oni kombinuju sa pravilima domene (npr. simultani skok električne provodljivosti i zamućenosti u sušnim uslovima) (Liu, Ting, & Zhou, 2008; Chandola et al., 2009). Važno, svaki alarm mora imati XAI objašnjenje "zašto" — doprinosi po parametrima, odstupanje od sezonskog obrasca, poređenje s historijskim incidentima — kako bi bio institucionalno prihvatljiv. U evaluaciji se koriste standardne metrike (precision/recall/F1; lažno pozitivna stopa) te operativne (vrijeme do potvrde; procenat slučajeva riješen u SLA). Implikacija za ovaj rad je: Primjenjujemo hibrid: (i) sezonski korigovani reziduali + pragovi, (ii) jedan jednostavan ML detektor baziran na mašinskom učenju (*eng. Machine Learning*, ML) (npr. Isolation Forest) kao "druga linija", (iii) pravila domene i (iv) XAI izvještaj uz svaki alarm. Kalibracija je mjesečna na historijskim slučajevima. Iskustva evropskih zemalja pokazuju da uspjeh ne zavisi samo od broja stanica, nego od upravljanja podacima i procedura:

"Data-first" katalozi (npr. nordijske prakse) sa strogo definisanim metapodacima i API-jem smanjili su ručni rad i ubrzali spajanje izvora; javni paneli ojačali su transparentnost.

Operativni protokoli (npr. nizozemska iskustva) eksplicitno definišu: ko potvrđuje alarm, kojim redoslijedom se obavještava operater/inspekcija, koji su rokovi (SLA) i kako se dokumentuje odgovor.

"Lightweight" standardi u startu (jedinstveni ID tačke, koordinate, parametar, jedinica, metoda, vrijeme, izvor, status validacije), pa fazna nadogradnja prema punim INSPIRE/WFD zahtjevima — pristup koji je brži i otporniji na institucionalnu raznolikost.

Hibridna analitika + XAI gradi povjerenje, jer operateri i inspekcije odmah vide šta je "povuklo" alarm i zašto.

Predloženi okvir usvaja upravo ove lekcije: minimalni, ali strogo definisan metapodatkovni profil; otvoreni API; proceduralna jasnoća (INFO/WARN/ALERT + SLA) i XAI u svakom koraku. Za institucionalni kontekst BiH (entitetske/kantonalne razlike, različiti stepen digitalne zrelosti) najisplativiji je fazni pristup:
 uspostaviti katalog i TS skladište s minimalnim metapodacima;
 pokrenuti hibridnu analitiku s XAI izvještajima nad sekundarnim podacima;
 formalizovati INFO/WARN/ALERT lance i SLA rokove;
 objaviti stručni i javni panel (agregati i trendovi) uz zaštitu osjetljivih podataka;
 fazno širiti izvore i prelaziti ka punim standardima (INSPIRE/WFD) i plug-in senzorima (SensorThings).

3. METODOLOŠKI OKVIR

Ovo poglavlje operacionalizuje prijedlog kroz radne pakete (RP), analitički tok i evaluacijske metrike. Dizajn je "data-first": prvo uvodimo minimum zajedničkih metapodataka i katalog/TS skladište, zatim hibridnu analitiku s objašnjivim izlazima (XAI), a sve uvezujemo s INFO/WARN/ALERT procedurama i SLA rokovima (European Parliament & Council, 2000; European Commission, 2007, 2024; ISO, 2014; OGC, n.d.). U tabeli 2 je dat pregled radnih paketa, ciljeva i isporuka.

Tabela 2. Radni paketi (RP) — ciljevi i isporuke

RP	Cilj (šta postiže)	Ključne isporuke
RP1 – Inventar & standardizacija	Mapirati izvore, uspostaviti minimalni, INSPIRE/ISO-kompatibilni profil metapodataka i rječnike	Popis izvora; JSON shema metapodataka; rječnici (parametar, jedinica, status validacije); validator (European Commission, 2007; ISO, 2014)
RP2 – Katalog & TS skladište + API	Upostaviti DCAT-AP-like katalog i skladište vremenskih serija s auditom i kontrolom pristupa	Katalog skupova (DCAT-AP kompatibilan); Timeseries (npr. PostgreSQL/Timescale); REST API s autorizacijom i audit tragom (European Commission, 2024; OGC, n.d.)
RP3 – Analitika & XAI	Hibridni detektori anomalija nad sekundarnim podacima, objašnjivi izlazi i kompozitni skor rizika	STL reziduali + pragovi; Isolation Forest kao "druga linija"; pravila domene; XAI izvještaj uz svaki alarm (Cleveland et al., 1990; Liu, Ting, & Zhou, 2008; Chandola, Banerjee, & Kumar, 2009)
RP4 – Operativa (INFO/WARN/ALERT)	Proceduralno uvezati alarme s verifikacijom, sistemom prijava / ticket sistemom i SLA rokovima	Matrica uloga; eskalacioni lanci; sistem prijava / ticket sistem; stručni i javni panel (WFD/INSPIRE kompatibilna terminologija)
RP5 – Politike, ugovori & finansije	Minimum zajedničkih pravila, ugovori o razmjeni, TCO/TBO okvir	Aneks standarda razmjene; model-ugovori; okvir CapEx/OpEx i plan održivosti
RP6 – Edukacija & M&E	Obuke po ulozi i "monitoring & evaluacija	Priručnici; plan obuka (laboratorije/komunalna/inspekcije); KPI set i kvartalni izvještaji

Izvor: vlastiti izvor

3.1. ANALITIČKI TOK

Ulaz & priprema. Podaci prolaze validaciju sheme (nazivi, jedinice, format vremena ISO 8601, koordinate WGS84) i osnovne kontrole kvaliteta (opseg, nedostajuće vrijednosti).

Kratke praznine interpoliraju se konzervativno; dugačkim prazninama se ne "pomaže" — označavaju se kao takve.

Linija 1 – statistička osnova. Sezonska dekompozicija (npr. STL) i analiza reziduala; robustni z-score i kontrolne karte za brzo, objašnjivo označavanje odstupanja (Cleveland et al., 1990). Ova linija daje transparentne pragove i lako tumačenje.

Linija 2 – ML detekcija anomalija. Isolation Forest nad vektorima obilježja (vrijednost, promjena, kratke historije, hidro-meteorološki kontekst poput padavina/protoka/temperatura). Cilj je "uhvatiti" nelinearne kombinacije koje linija 1 propušta (Liu et al., 2008; Chandola et al., 2009).

Linija 3 – pravila domene. Heuristike stručnjaka (npr. istovremeni porast provodljivosti i zamućenosti u sušnom periodu ⇒ vjerovatni antropogeni signal). Pravila mogu i poništiti alarm (npr. iznenađni rast zamućenosti tokom intenzivnih padavina u slivu).

Fuzija & skor rizika. Tri linije se spajaju u kompozitni skor koji se mapira na INFO/WARN/ALERT pragove. Svaki alarm dobija XAI objašnjenje: doprinos po parametrima, efekat sezonalnosti, odnos sa hidro-meteorološkim kontekstom, uporedba s historijskim incidentima.

Operativni izlaz. Alarm → automatska notifikacija → verifikacija (u SLA roku) → ticket (akcije, odgovorne osobe, vrijeme) → zatvaranje slučaja s "lekcijama" za mjesečnu kalibraciju pragova i modela.

3.2. EVALUACIJA I METRIKE

Evaluaciju vodimo na dva kolosijeka: najprije mjerimo analitičku tačnost modela na historijskim slučajevima, a zatim operativnu efikasnost čitavog toka od alarma do akcije. Treći stub su kvalitet podataka i interoperabilnost, dok četvrti obuhvata kontinuirano učenje kroz redovnu kalibraciju (Cleveland et al., 1990; Chandola, Banerjee, & Kumar, 2009). U domenu analitičke tačnosti, fokus je na odnosu preciznosti i odziva te na njihovoj kombinaciji kroz F1 mjeru. Ciljni pragovi su postavljeni ambiciozno: odziv treba biti najmanje 0,80, dok se stopa lažno pozitivnih slučajeva zadržava do najviše 0,05. Kada za neki tip incidenta raspoložemo dovoljnim brojem označenih primjera, procjenu dopunjujemo analizom ROC krivih (krivulje operativne karakteristike primaoca) i PR krivih (odnos preciznosti i odziva) kako bismo bolje procijenili ponašanje detektora u režimima različitih pragova (Chandola et al., 2009). Stabilnost modela pratimo i kroz sezonsku komponentu: izmjene pragova između mjeseci i sezona moraju biti dosljedne i objašnjive, u skladu sa sezonskom dekompozicijom vremenskih serija (Cleveland et al., 1990). Operativna efikasnost mjeri se vremenom koje protekne od alarma do verifikacije i reakcije. Očekujemo da se informativni alarm (INFO) potvrdi u roku od 24 sata, upozorenje (WARN) u roku od najviše četiri sata, a uzbuna (ALERT) eskalira u roku od 60 minuta, uz obaveznu službenu zabilješku. Uspješnost sistema izražavamo udjelom slučajeva zatvorenih unutar SLA rokova, a kvalitet odlučivanja osiguravamo time što svaki alarm sadrži XAI objašnjenje – kratko "zašto" u kojem su naznačeni doprinosi pojedinih parametara, odstupanje od sezonskog obrasca i hidro-meteorološki kontekst. Transparentnost pratimo preko korištenja javnog nadzornog panela i redovne objave agregiranih pokazatelja.

Kvalitet podataka i interoperabilnost oslanjaju se na minimalni metapodatkovni profil: kompletiranost metapodataka treba dostići najmanje 95%, dok konzistentnost rječnika i mjernih jedinica prevedenih na zajednički standard mora biti najmanje 98%. Sljedivost je obavezna: svaki zapis mora imati jasan audit trag (ko je šta mijenjao i kada). Na kraju, sistem se uči iz prakse. Jednom mjesečno radimo "post-mortem" svih alarmnih događaja, fino podešavamo pragove, preispitujemo korisnost pravila domene i, po potrebi, mijenjamo težine u fuziji triju analitičkih linija. Kvartalno izvještavamo KPI i SLA pokazatelje Vijeću za podatke i operativnom uredu te vodimo evidenciju promjena pravila i njihovog uticaja na rezultate, uz

dosljedno oslanjanje na logiku sljedivosti WFD/INSPIRE, katalogizaciju u skladu s DCAT-AP i mogućnost kasnijeg priključenja senzora putem OGC SensorThings.

4. PREDLOŽENA ARHITEKTURA RJEŠENJA

Arhitektura pretvara raspršene sekundarne podatke u operativna upozorenja s objašnjivim izlazima i jasno definisanim protokolima. Dizajn je slojevit i "data-first": na ulazu se podaci preuzimaju u dogovorenim formatima (npr. CSV/JSON) te automatski provjeravaju prema zajedničkoj šemi — nazivi parametara, jedinice, vrijeme (ISO 8601), koordinate (WGS84) i statusi zapisa ("preliminarno/validirano/korigovano"). Nakon validacije, zapisi se opisuju u katalogu i pohranjuju u skladištu vremenskih serija sa kompletnim metapodacima, audit tragom i verzionisanjem, što omogućava sljedivost i kasniju reprodukciju nalaza. Nad ovim temeljem radi hibridna analitika u tri koraka: (1) sezonska dekompozicija i reziduali s robusnim pragovima kao transparentna prva linija; (2) jednostavan detektor anomalija (npr. Isolation Forest) koji hvata nelinearne obrasce; te (3) pravila domene koja razlikuju očekivane hidro-meteorološke efekte od vjerovatnih antropogenih signala. Rezultati tri linije spajaju se u kompozitni skor rizika koji se mapira na INFO/WARN/ALERT, a svaki alarm dobija kratko XAI objašnjenje "zašto" (doprinos parametara, sezonalnost, uporedba s historijskim slučajevima). Pristup podacima i rezultatima je kroz dokumentovani REST API s kontrolom pristupa i dnevnikom poziva. Stručni nadzorni panel prikazuje alarme u realnom vremenu, XAI objašnjenja, karte/tabele, status ticketa i SLA tajmere, dok javni panel nudi agregirane indikatore i trendove uz poštivanje pravila o zaštiti osjetljivih informacija. Sigurnost je osigurana kontrolama po ulozi te šifriranjem "u prijenosu i mirovanju", a svaka izmjena ostavlja audit trag i novu verziju zapisa; politike zadržavanja podataka su jasno propisane. Interoperabilnost i usklađenost oslanjaju se na DCAT-AP i ISO 19115 za metapodatke te OGC SensorThings kao prirodan put ka kasnijem priključenju senzorskih mreža, u skladu s evropskim okvirima poput WFD/INSPIRE (European Commission, 2024; ISO, 2014; OGC, n.d.; European Parliament & Council, 2000). Cijeli sistem je "plug-in": kasnije je moguće dodati nove izvore i terenske senzore bez promjene jezgra i prekida rada.

5. Preporuke za implementaciju

Polazimo od minimuma zajedničkih pravila: obavezni metapodaci i kontrolisani rječnici uz sljedivost i verzionisanje čine heterogene izvore odmah usporedivim, a otvoreni, dokumentovani API postaje zajednički jezik razmjene. Svako upozorenje mora imati kratko XAI objašnjenje "zašto" radi institucionalnog povjerenja. Primjena je fazna: sada minimum i sekundarni podaci, kasnije "plug-in" senzori bez promjene jezgra; transparentnost se osigurava stručnim i javnim panelima uz predvidiv operativni trošak (European Parliament & Council, 2000; European Commission, 2007, 2024; ISO, 2014; OGC, n.d.; Adadi & Berrada, 2018). Most prema praksi su SLA protokoli: INFO, WARN i ALERT mapirani su na pragove i kompozitni skor rizika; za svaki događaj otvara se ticket s odgovornim akterom, rokom i ishodom, uz očekivane rokove 24 h (INFO), 4 h (WARN) i 60 min (ALERT) i mjesečnu kalibraciju pragova i pravila domene kako bi se smanjio "zamor od alarma" (European Parliament & Council, 2000; Adadi & Berrada, 2018).

Finansijski okvir kombinuje početni CapEx (katalog, skladište vremenskih serija, osnovni API, standardizacija) i kontinuirani OpEx (hosting/sigurnost, administracija podataka, podrška, revizije modela), uz mjeru efikasnosti kroz trošak po izvoru/tački/ticketu i izvore finansiranja koji spajaju budžet s grantovima/IPA instrumentima (ISO, 2014; European Commission, 2024). Uspjeh zavisi od obuka po ulozi i KPI/SLA praćenja (preciznost, odziv, F1, vrijeme do potvrde, udio slučajeva zatvorenih u SLA; kvalitet metapodataka i rječnika), uz kvartalne izvještaje i javne aggregate.

Ključni rizici—neujednačen kvalitet podataka, institucionalni otpori, zasićenje alarmima i budžetska neizvjesnost—ublažavaju se validatorom šeme i statusima validacije s audit tragom, model-ugovorima i minimalnim rječnicima, XAI objašnjenjima i mjesečnom kalibracijom, te modularnom arhitekturom i otvorenim specifikacijama. Tako postavljen okvir minimizira rizik, ubrzava ostvarenje vrijednosti i zadržava prostor za kasniju fizičku nadogradnju bez promjene temeljne arhitekture (European Parliament & Council, 2000; European Commission, 2007, 2024; ISO, 2014; OGC, n.d.).

ZAKLJUČAK

Predloženi projektni okvir pokazuje da se u Bosni i Hercegovini može značajno unaprijediti monitoring i zaštita vodnih resursa bez uvođenja novih terenskih mjerenja. Ključ je u tome da se postojeći, danas raspršeni podaci (laboratorijski nalazi, hidro-meteorološke serije, administrativne i operativne evidencije) dovedu u jedinstvenu, interoperabilnu formu, uz katalog skupova, skladište vremenskih serija i otvoreni API. Na toj osnovi, hibridna analitika (sezonski korigovani reziduali + detekcija anomalija + pravila domene) generiše objašnjive (XAI) alarme koji su direktno povezani s INFO/WARN/ALERT protokolima i SLA rokovima. Time se mjeri i skraćuje vrijeme „od sumnje do potvrde i intervencije“, a istovremeno podiže transparentnost (stručni i javni panel). Okvir je fazan i realistično izvodiv: Faza I uspostavlja minimum zajedničkih pravila (metapodaci, rječnici), katalog i osnovni API; Faza II uvodi analitiku s XAI objašnjenjima i operativne protokole; naredne faze šire izvore i koriste plug-in pristup ka senzorskim mrežama, bez promjene jezgra. Ovakav dizajn smanjuje rizik “velikog praska”, omogućava brz povrat koristi i olakšava usklađivanje sa evropskim standardima (WFD/INSPIRE/DCAT-AP/ISO/OGC). Ograničenja su svjesno prihvaćena: kvalitet i pokrivenost podataka variraju; postoje regulatorne razlike među nivoima vlasti; u ranoj fazi evaluacije se oslanjaju na historijske incidente, a ne na nova mjerenja. Zato su u dizajn ugrađeni validator šeme, statusi validacije, audit trail, mjesečna kalibracija pragova i kvartalni KPI/SLA izvještaji – kako bi sistem vremenom postajao precizniji i institucionalno prihvaćeniji. Za dalji rad predlažemo tri pravca: (i) precizniju operacionalizaciju model-ugovora o razmjeni i minimalnog metapodatkovnog profila kao pravnog aneksa; (ii) pripremu otvorenih specifikacija API-ja i priručnika po ulozi (laboratorije, operateri, inspekcije); (iii) plan pilot-implementacije na reprezentativnom skupu aktera (po jedan kanton/grad + operater + laboratorija), s jasnim ciljevima (npr. $FPR \leq 5\%$, $recall \geq 80\%$, $\geq 90\%$ slučajeva zatvorenih u SLA). Takav pilot bi, u roku 6–12 mjeseci, potvrdio vrijednost pristupa i dao mjerljive argumente za skaliranje na nivo entiteta/kantona. Ukratko, vrijednost već postoji u postojećim podacima. Standardizacijom, objašnjivom analitikom i jasnim protokolima moguće je pretvoriti te podatke u pravovremenu, provjerljivu i akcijski korisnu informaciju – uz troškovno razuman put ka modernom, transparentnom i pouzdanom sistemu zaštite voda u BiH.

LITERATURA

1. Adadi, A., & Berrada, M. (2018). Peeking inside the black-box: A survey on explainable artificial intelligence (XAI). *IEEE Access*, 6, 52138–52160. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2870052>
2. Agencija za vodno područje Jadranskog mora. (2024). Plan upravljanja rizikom od poplava 2024–2029 (FBiH, vodno područje Jadranskog mora). Mostar.
3. Chandola, V., Banerjee, A., & Kumar, V. (2009). Anomaly detection: A survey. *ACM Computing Surveys*, 41(3), Article 15. <https://doi.org/10.1145/1541880.1541882>
4. Cleveland, R. B., Cleveland, W. S., McRae, J. E., & Terpenning, I. (1990). STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess. *Journal of Official Statistics*, 6(1), 3–73.
5. European Commission. (2007). Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). *Official Journal of the European Union*, L 108, 1–14.
6. European Commission. (2024, June 18). DCAT-AP v3.0.0: DCAT application profile for data portals in Europe. Interoperable Europe.
7. European Parliament & Council. (2000). Directive 2000/60/EC establishing a framework for Community action in the field of water policy (Water Framework Directive). *Official Journal of the European Union*, L 327, 1–73.
8. Federalno ministarstvo poljoprivrede, vodoprivrede i šumarstva. (2010). Water management strategy of the Federation of Bosnia and Herzegovina 2010–2022. FMPViŠ.
9. International Organization for Standardization. (2014). ISO 19115-1:2014 — Geographic information — Metadata. ISO.
10. International Sava River Basin Commission. (2023). Drugi plan upravljanja slivom rijeke Save. ISRBC.
11. Liu, F. T., Ting, K. M., & Zhou, Z.-H. (2008). Isolation forest. In *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Data Mining* (pp. 413–422). IEEE.
12. Open Geospatial Consortium. (n.d.). Observations and Measurements (O&M) Standard. OGC.
13. Open Geospatial Consortium. (n.d.). SensorThings API Part 1: Sensing (v1.1). OGC.
14. Vlada Federacije Bosne i Hercegovine. (2012). Strategija upravljanja vodama Federacije Bosne i Hercegovine 2010–2022. Zavod za vodoprivredu.
15. World Bank. (2024, November 20). Investments in resilience can help protect Bosnia and Herzegovina from climate shocks (Country Climate and Development Report – BiH). World Bank.