

Primena paralelnog NSGA-II algoritma u razvoju matematičkih modela za potrebe uređenja režima podzemnih voda

Dejan Milošev¹, Nikola Milivojević², Vladimir Milivojević³, Vladimir Lukić⁴

APSTRAKT: Uređenje režima voda, kao preduslov za održivi razvoj nekog područja, najčešće se oslanja na više mera čija se primenljivost i ukupna efikasnost ispituju u fazi izrade studijskih analiza i projektovanja vodoprivrednih sistema. Komplikovani prirodni uslovi i kompleksne društvene okolnosti mogu usloviti preplitanje faktora i potrebu za istovremenim ispunjenjem više ciljeva, te se u zadatom kontekstu moraju istražiti i oceniti ponuđena rešenja. Tokom vremena mogu nastati i situacije koje nisu predviđene, što može rezultovati smanjenjem stepena uređenosti vodoprivredne problematike i povećanjem ranjivosti predmetnog područja. Vrednovanje mogućih unapređenja režima podzemnih voda analizom budućih stanja se decenijama unazad rutinski sprovodi na matematičkim modelima. Razlog za njihovu primenu je relativno lako sagledavanje interakcije čimilaca, kojima se mogu dodeliti različite vrednosti i na taj način preispitati različiti scenariji. Sa druge strane, kada se radi o područjima velike površine, raznorodne namene zemljišta ili većeg broja objekata kojima se upravlja režimom voda, proračuni postaju veoma zahtevni u pogledu ljudskih i računarskih resursa. U ovom radu će na primeru iz prakse biti prikazan postupak razvoja i kalibracije složenog MODFLOW modela primenom paralelnog NSGA-II optimizacionog algoritma. Paralelni NSGA-II algoritam realizovan je na distribuiranoj računarskoj platformi i posebna pažnja će biti posvećena postupku definisanja optimizacionog problema i uticaju izbora parametara optimizacionog algoritma na njegovu efikasnost.

Ključne reči: hidraulika podzemnih voda, numeričko modeliranje u hidrotehnici, MODFLOW, NSGA-II

Parallel NSGA-II algorithm application in development of mathematical models for groundwater management

ABSTRACT: Water management, as a prerequisite for a sustainable development of an area, usually implies number of measures whose applicability and overall efficiency are examined through studies and design analyses. Complex natural and social circumstances can govern the intertwining of factors and the offered solutions must be explored and evaluated to simultaneously meet multiple goals. Over time, situations not previously foreseen may arise, which may result in water management issues, exposing the subject area to risks. The evaluation of possible groundwater regime improvements is for decades routinely carried out on mathematical models. The reason for their application is the relatively easy consideration of the interaction of factors, whose parameters can be characterized with different values and thus reconsider different scenarios. On the other hand, due to a size of an area, diverse land use or large number of water management facilities, computations become very demanding in terms of human and computer resources. In this paper, the process of development and calibration of a complex MODFLOW model using a parallel NSGA-II optimization algorithm will be presented on a practical example. The parallel NSGA-II algorithm is implemented on a distributed computer platform and special attention will be paid to the process of defining the optimization problem and the influence of the choice of optimization algorithm parameters on its efficiency.

Keywords: groundwater hydraulics, hydrotechnical numerical models, MODFLOW, NSGA-II

¹ Dejan Milošev, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, dejan.milosev@jcerni.rs

² Dr Nikola Milivojević, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, nikola.milivojevic@jcerni.rs

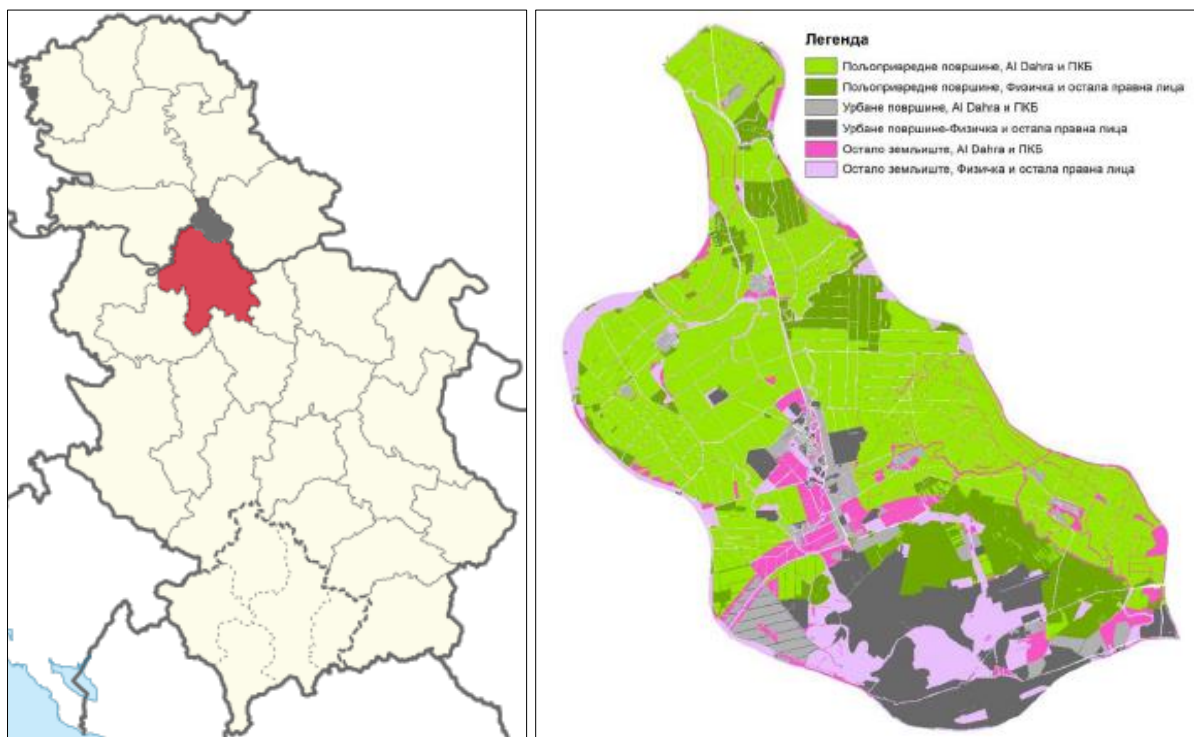
³ Vladimir Milivojević, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, vladimir.milivojevic@jcerni.rs

⁴ Vladimir Lukić, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, vladimir.lukic@jcerni.rs

1 Uvod

Pančevački rit je deo beogradske opštine Palilula, prostire se u okviru aluvijalne ravni Dunava i Tamiša, površine 33.400 ha unutar odbrambenih nasipa koji prostor štite od velikih voda spoljnih vodotoka. Kote terena Pančevačkog rita kreću se od 69,5 do 75,0 m, sa izraženim mikoreljefskim oblicima, nastalim od starih tokova Dunava i Tamiša.

U severnom delu Pančevačkog rita izdvajaju se zone na kojima je zastupljena samo poljoprivredna delatnost, kao i zone na kojima su poljoprivredne površine delimično uzurpirane gradnjom objekata. Južni deo Rita, sa naseljima Borča, Ovča, Crvenka, Kotež i Krnjača predstavlja urbanizovanu celinu sa stambenim naseljima i privrednom zonom (Slika 1).



Slika 1. Položaj Pančevačkog rita u širem okruženju (levo) i način korišćenja zemljišta (desno).

Figure 1. Location of Pančevački rit (left) and the usage of land (right).

Intenziviranje naseljavanja na predmetnom području započelo je pre 100 godina, posle Prvog svetskog rata i u kontinuitetu se nastavilo tokom celog XX veka. Rit danas naseljava preko 100.000 stanovnika, a zbog blizine centru Beograda sasvim je izvesna dalja urbanizacija koja će za posledicu imati pretvaranje jednog dela poljoprivrednog zemljišta u novo građevinsko zemljište.

Izgradnja odbrambenih nasipa u periodu 1929-1935. g. može se uzeti kao početak sistematskog uređenja režima voda na području Pančevačkog rita. Nasipima se područje štiti od štetnog dejstva velikih voda Dunava i Tamiša i izlivanja koje se pre njih redovno ispoljavalo zahvaljujući niskim kotama terena u Ritu. U prvo vreme su za odvođenje unutrašnjih voda iskorišćeni ostaci prirodnih tokova (bivši rukavci Dunava i Tamiša) i pumpne stanice za prepumpavanje vode van područja. Time su se postepeno stvarali uslovi da se močvare i pašnjaci pretvore u zemljište za intenzivnu ratarsku, povrtarsku i ostalu poljoprivrednu proizvodnju.

Sistem zaštite od spoljašnjih i unutrašnjih voda je vremenom unapređivan dogradnjom, sanacijom i rekonstrukcijom objekata. Pored investicionog održavanja, povod su sa jedne strane bile prirodne okolnosti (poplavni talasi Dunava ili Tamiša karakterisani višim nivoima ili dužim trajanjem, poplave od atmosferskih voda većih intenziteta), a sa druge uspostavljanje urbanih sadržaja i

visokovredne poljoprivredne proizvodnje koji su zahtevali adekvatnu dodatnu zaštitu. Situacija sa složenim vodnim režimom u okviru niskih područja Pančevačkog rita dodatno se usložnjava izgradnjom HEPS „Đerdap 1“, punjenjem akumulacije i formiranjem uspora na Dunavu.

Danas sistem zaštite Pančevačkog rita čini oko 90 km nasipa prema spoljnim vodotocima, više od 800 km melioracionih kanala, horizontalna cevna drenaža na preko 6.100 ha, sedam pumpnih stanica ukupnog kapaciteta agregata blizu 36 m³/s i brojni objekti u funkciji njihovog rada (ustave, propusti i sl.).

Odsustvo redovnog godišnjeg održavanja objekata, kao opšta karakteristika stanja u vodoprivredi, primetno je i u Pančevačkom ritu a pre svega utiče na kanalsku mrežu čije održavanje, zbog velike dužine, svake godine zahteva znatna sredstva. Nakupljeni mulj u kanalima smanjuje propusnost kosina i dna kanala, pa je dotok podzemnih voda u kanale smanjen. Mulj ujedno ne dozvoljava održavanje projektovanih nivoa vode u kanalima. Izrasla vegetacija smanjuje proticajne profile i povećava otpore, pa je tečenje kanalima manje. Posledice neodržavanja nisu jednako izražene po prostoru, pa najviše trpe zemljišta na nižim terenima, težeg mehaničkog sastava i lošijih vodno-fizičkih osobina, a generalno površine najudaljenije od kanala. Delovi kanalske mreže u prolazu kroz naseljena mesta mogu se smatrati „smetnjom“ za širenje građevinskog zemljišta, pa je rešenje pronađeno u zacevljenju kanala, često bez adekvatnih analiza posledica takvih promena. Istovremeno, kanali u naseljima predstavljaju recipijent atmosferskih voda, koje se gravitaciono slivaju sa nepropusnih površina jer uglavnom ne postoji atmosferska kanalizacija. U kanale dospeva i upotrebljena voda, i to na dva načina – neposredno, jer pojedinci direktno ispuštaju upotrebljenu vodu u kanale i posredno, pražnjenjem septičkih jama koje su i dalje prisutne u zoni individualnog stanovanja.

Sve navedeno utiče na smanjenje efikasnosti sistema i dovodi do povećanja ranjivosti područja u vezi sa narušavanjem zaštite od unutrašnjih voda, podzemnih i površinskih.

2 Namena matematičkog modela režima voda

Iz izloženog se jasno prepoznaje današnja složenost interakcije prirodnih uslova i društvenih okolnosti na području Pančevačkog rita. Problemima koji iz te interakcije proizilaze treba dodati i [1]

- sistem je u današnjem obuhvatu koncipiran pre više od 30 godina,
- korišćenje prostora se menjalo kroz vreme,
- u poslednjih desetak godina zabeležena je pojava padavina koje nisu evidentirane ranijim studijama i projektima,
- broj pijeziometara za osmatranje nivoa podzemnih voda se vremenom smanjivao,
- prisutno je određeno odstupanje od propisanog upravljanja objektima.

Prepoznavanje nedostataka postojećeg stanja sistema i vrednovanje mogućih unapređenja analizom budućih stanja se decenijama unazad rutinski sprovode na matematičkim modelima za simulaciju režima voda. Razlog za njihovu primenu je relativno lako sagledavanje međusobnog uticaja više činilaca, čijim parametrima se mogu dodeljivati različite vrednosti i na taj način preispitati različiti scenariji budućih stanja.

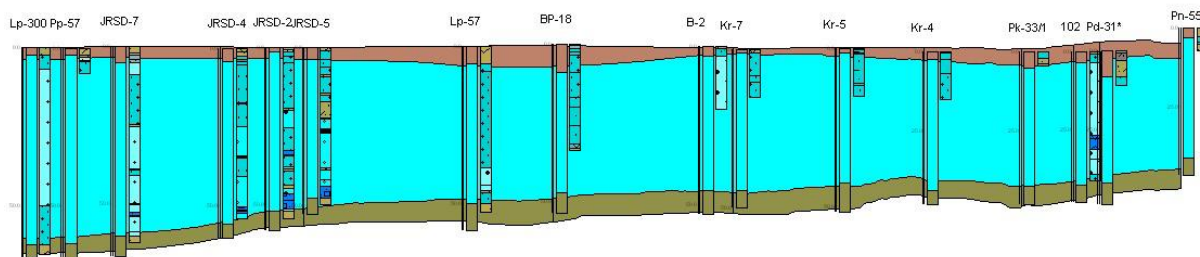
Sa druge strane, konkretan model je veoma složen jer postupak kalibracije mora da obuhvati više decenija proračuna kako bi se u modelu reflektovalo stanje za koje postoje osmatranja podzemnih voda na području Rita. Proračuni na modelu moraju da se realizuju za nestacionarne uslove zbog promenljivosti parametara koji karakterišu granične uslove i zbog sveobuhvatnog ispitivanja važećih kriterijuma za zaštitu područja od podzemnih voda (kada su kriterijumi narušeni, u kom trajanju i sl.).

Izrada kompleksnih modela zahteva znatne ljudske i računarske resurse, posebno u slučajevima kada se radi o područjima velike površine, raznorodne namene zemljišta ili većeg broja parametara od kojih neki mogu da predstavljaju način upravljanja režimom voda. U tom segmentu je značajna uloga primene evolucionih i genetskih algoritama, što je dokumentovano u literaturi [2], [3], [4].

3 Hidrogeološki uslovi

U prethodnim decenijama je na području Pančevačkog rita sproveden veliki obim istražnih radova, bušenjem do dubine od oko 45 m – od izrade pijeziometarskih bušotina, preko bunara do geotehničkih istraživanja za potrebe definisanja uslova izgradnje objekata. Na osnovu sveobuhvatne reinterpretacije rezultata tih radova, pre svega analizama opisa i granulometrijskog sastava nabušenih sredina, može se govoriti o postojanju primarno moćnog peskovitog kompleksa debljina generalno i preko 30 m. Podinu ovog kompleksa na apsolutnim kotama od 30 do 35 m n.v. (lokalno i oko 10 m n.v.), kao nesumnjivu barijeru za migracije podzemnih voda izgrađuju laporovite gline, zaglinjeni obluci sitnozrnog šljunka kao i uslojene smene prašina i glina (K_f reda 10^{-8} m/s). Povlatni sloj čine zone sa propusnim alevritskim, lesolikim, lesoidnim i sitnozrnim peskovima, sa relativno dobrim filtracionim karakteristikama (K_f reda veličine 10^{-6} do 10^{-5} m/s), i zone gde su povlatni horizonti izgrađeni od slabovodopropusnih partija (muljevito glinovitih, deluvijalno prašinstih i tehnogenih), čiji se koeficijenti filtracije kreću u opsegu od 10^{-8} do 10^{-7} m/s. Sledi da se zbog karakteristika povlatnog sloja mogu javiti manja ili veća prevlaživanja, do čak zabarenja površine terena.

Na Slici 2 je prikazan primer šematizacije povlatnog, vodnosnog i podisnog sloja duž jednog profila trasiranog na području Rita.



Slika 2. Šematizovani slojevi podzemne sredine.

Figure 2. Schematized layers of underground domain.

Još u periodu pre uspostavljanja uspora HE „Đerdap 1“, 1950. godine, formirana je mreža pijeziometara tako da se osmatranjima pokrije celo područje Pančevačkog rita. Dopune i obnavljanja pijeziometara vršene su tokom proteklih decenija, kao i redovna osmatranja nivoa podzemnih voda, što omogućava sagledavanje režima podzemnih voda Pančevačkog rita, za koji se može konstatovati da je u funkciji više faktora: vodostaja Dunava, Tamiša, i mreže površinskih tokova, melioracionih kanala i drugih vodenih površina, ali isto tako i klimatskih prilika. U uskim zonama u priobalnoj zoni reka, dominantan je uticaj spoljnjih reka zbog izražene hidrauličke veze i uslova prihranjivanja iz toka Dunava i Tamiša. U režimima prosečnih vodostaja pod uticajem uspora, Dunav u najvećem delu godine hrani izdan. Sa aspekta klimatskih uslova, parametri vertikalnog bilansa (količine i raspored padavina, veličine evaporacije i evapotranspiracije) imaju značajnu ulogu u formiranju režima podzemnih voda. Naročito izražen uticaj imaju na površinama koje su udaljenije od Dunava i Tamiša te u zonama nešto ređe kanalske mreže za odvodnjavanje. Na tim površinama uočava se odgovarajuća zavisnost između režima nivoa podzemnih voda i padavina, odnosno evapotranspiracije.

Uslove isticanja, odnosno dreniranja podzemnih voda Rita, diktira sistem za odvodnjavanje, koji čine pumpne stanice, kanalska mreža i cevna drenaža. Mreža drenažnih kanala, koja je intenzivno razvijana na ovom prostoru, uliva se u velike kanale koji vode do crpilišta pumpnih stanica (sedam danas aktivnih stanica). Drenažni sistem, preko održavanih vodostaja u kanalskoj mreži, diktira generalne nivoe podzemnih voda.

Za potrebe ocene ugroženosti terena od visokih voda, izvršena je analiza registrovanih pijeziometarskih nivoa u periodu 1987. – 2016. godina. U tu svrhu, analizirani su podaci svih

pijezometara, bez obzira na njihov broj, učestalost, vremensku distribuciju i prostornu neravnomernu zastupljenost. U razmatranom periodu su beleženi nivoi podzemnih voda u granicama od 69 do 72 m n.v. Minimalne dubine u višegodišnjem monitoringu nivoa podzemnih voda evidentne su u mesecu maju i kreću se u opsegu od 0,3 do 1,3 m. Maksimalne dubine su takođe u mesecu maju, ili junu, u opsegu od 1,6 do 3,6 m. U zimskim periodima godine, dubine do nivoa podzemnih voda u centralnim delovima Rita su u rasponu od 2,5 do 3,0 m.

4 Modeliranje režima voda na području

Za potrebe modeliranja režima voda razvijen je integralni model, koji čine

- model površinskih voda, i
- model podzemnih voda.

Model površinskih voda je baziran na distribuiranom hidrološkom modelu, koji fizičkim zakonima opisuje transformaciju komponenti vertikalnog bilansa uzimajući u obzir karakteristike proračunskih elemenata, HRU (Hydrologic Response Unit), dobijenih prostornom dekompozicijom modeliranog područja. Za potrebe modela su identifikovane ukupno 4 različite HRU na području (dve za poljoprivredno zemljište, dve za urbanizovano područje). Proračunom se ulazne veličine, padavine i temperature, preko namene korišćenja (vegetacija) i pedoloških karakteristika zemljišta, transformišu u oticaj u kanalsku mrežu (Q_{chn}), oticaj koji na određenim delovima područja završava u cevnoj drenaži (Q_{dren} na poljoprivrednom zemljištu) ili oticaj u kanalizacionu mrežu (Q_{sew} na urbanizovanom području), i oticaj u podzemnu sredinu (Q_{base}). Prve tri komponente oticaja doppevaju u kanalsku mrežu, dok se poslednja komponenta upućuje ka podzemnom vodnom resursu. Rezultati modela površinskih voda se obračunavaju pomoću Python skripte, koja implementira jednačine za transformaciju padavina u površinski i podzemni oticaj, za niz dnevnih ulaznih podataka u periodu 1.1.1987. - 31.12.2016.

Matematički modeli su u opštem slučaju predstavljeni sistemom jednačina za rešavanje nekom od numeričkih metoda, graničnim i početnim uslovima, kao i parametrima oblasti strujanja (geometrija, filtracione karakteristike). Zadatak modela je da se proračunima simuliraju elementi režima podzemnih voda, kako u prirodnim uslovima, tako i u uslovima primene raznih tehničkih mera. Za simulaciju strujanja podzemnih voda Pančevačkog rita je korišćenja softverska aplikacija otvorenog koda MODFLOW 2005 [5], koja je zahvaljujući tačnosti i efikasnosti široko rasprostranjena u stručnoj i naučnoj upotrebi.

Na osnovu rezultata analize raspoloživih podataka terenskih i ostalih istraživanja, sprovedenih na području Rita, što je potvrđeno i prethodnim studijskim i modelskim radovima, strujanje podzemnih voda analizirane izdani se generalno odlikuje uslovima strujanja u tzv. dvoslojevitoj sredini. Donji sloj je predstavljen vodonosnim, pretežno peskovitim slojem, u kome se odvija dominantno (i to horizontalno) strujanje podzemnih voda, dok je u gornjem sloju izraženo kolebanje nivoa podzemnih voda.

Na osnovu prirodnih karakteristika i izgrađenih objekata na području, definisani su sledeći granični uslovi za rešavanje diferencijalnih jednačina:

- Spoljne reke i unutrašnji veliki vodotoci (RIV prema MODFLOW terminologiji) - reke Dunav, Tamiš i Karašac, koji opasuju područje Pančevačkog rita, svojim koritima se usecaju u vodonosni sloj i u direktnoj su hidrauličkoj vezi sa njim. Osim ovih reka, glavni kanali kanalske drenažne mreže Rita, od kojih su neki bivši prirodni vodotoci (Vizelj, Sibnica, Kalovita, Reva, itd.), takođe su svojim koritima delimično usečeni u ove naslage.
- Melioracioni kanali i horizontalna cevna drenaža (DRN prema MODFLOW terminologiji) - manji kanali nižeg reda uglavnom su izgrađeni u gornjem slabije propusnom glinovitom sloju, i nemaju kontakt sa vodonosnim slojem.
- Bunari za vodosnabdevanje (WEL prema MODFLOW terminologiji) - granični uslov sa zadatim protokom, koji predstavlja dva izvorišta Pančeva, „Sibnica“ i „Gradska šuma“ u

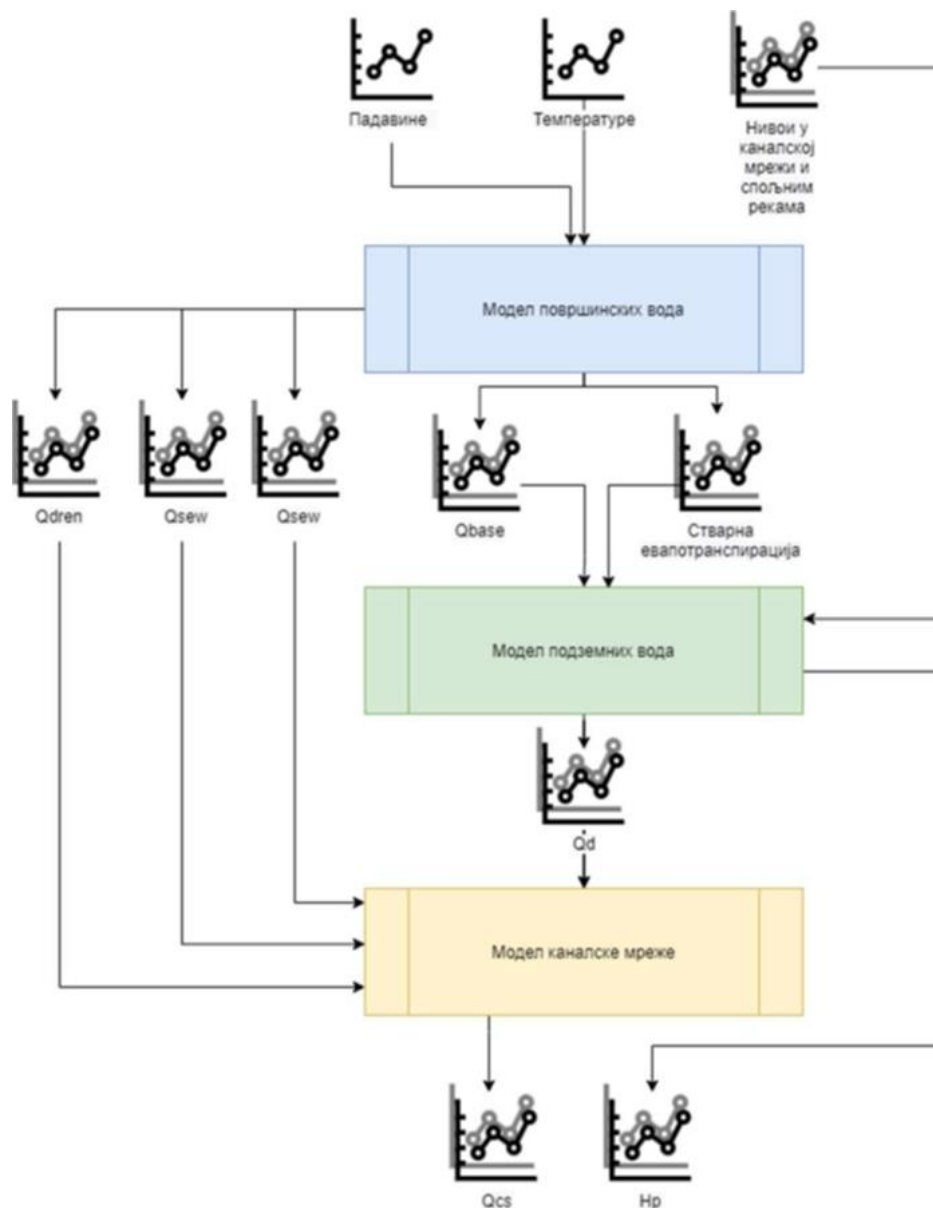
19. Savetovanje SDHI i SDH - Beograd, Srbija 2021. Conference SDHI & SDH - Belgrade, Serbia 2021.

jugoistočnom delu Rita, i nekoliko lokalnih izvorišta za potrebe manjih naselja i farmi u centralnom delu područja.

- Efektivna infiltracija (RCH prema MODFLOW terminologiji) – u modelu predstavlja infiltraciju dela padavina koji perkolacijom sa površine terena dospeva do podzemnih voda.
- Evapotranspiracija (EVT prema MODFLOW terminologiji) - evapotranspiracija simulira efekte transpiracije biljaka i direktne evaporacije iz saturisane zone podzemnih voda. U modelu, zbog nepostojanja direktne veze sa korenovim sistemom biljaka, pod ovim terminom se podrazumeva samo isparavanje sa nivoa podzemnih voda.

Svaki od navedenih graničnih uslova odlikuje jedan ili više parametara, čije poznavanje je preduslov za simulacije koje daju rezultate bliske vrednostima osmotrenim u prirodi.

Integralni model objedinjuje model površinskih voda i model podzemnih voda, prema šemi na Slici 3.



Slika 3. Integralni model - algoritam proračuna.

Figure 3. Integrated model - calculation algorithm.

Ulaz u integralni model čine vremenske serije za dnevne temperature, padavine, nivoe spoljnih reka, potencijalnu evapotranspiraciju, nivoe u kanalskoj mreži i protoci na bunarima za vodosnabdevanje.

Prvi deo integralnog modela predstavlja izračunavanje komponenti vertikalnog bilansa u modelu površinskih voda, iz čega se kao rezultat dobijaju vremenske serije Q_{dren} , Q_{chn} , Q_{sew} , Q_{base} . Oticaji Q_{base} iz svakog HRU se šalju modelu podzemnih voda kao ulaz za infiltraciju.

Nakon dobijenih rezultata iz modela površinskih voda, sledeći korak je pokretanje MODFLOW modela koji kao ulazne podatke koristi nivoe i komponentu baznog oticaja (Q_{base}) koji prihranjuje podzemnu vodu.

Kao konačan izlaz iz integralnog modela dobijaju se serije sa protocima na svim crpnim stanicama, kao i nivoui podzemnih voda na mestima na kojima su u modelu zadati pijeometri.

5 Kalibracija matematičkog modela

U postupku kalibracije tražene su optimalne vrednosti integralnog modela koje na što približnji način oslikavaju osmotreno stanje u oblasti koja je obuhvaćena simulacijama:

- hidraulička propusnost spoljnih reka (konduktansa CD prema MODFLOW terminologiji);
- hidraulička propusnost kanala (konduktansa CD prema MODFLOW terminologiji);
- koeficijenti filtracije prvog i drugog sloja porozne sredine;
- specifična poroznost prvog sloja;
- specifična izdašnost drugog sloja.

Podaci za poređenje su

- nivoui podzemne vode u modelskim ćelijama koje predstavljaju lokacije na kojima se u prirodi nalaze pijeometri,
- prepumpane količine vode, tj. protoci na pumpnim stanicama.

Kalibracija modela Pančevačkog rita predstavlja složeni optimizacioni problem u kome je potrebno odrediti takve parametre modela pri kojima će model davati rezultate najpribližnije merenim vrednostima. Ocena odstupanja rezultata modela od merenih vrednosti vrši se na osnovu dva kriterijuma:

J_V - kriterijum razlike proračunskih i osmotrenih vrednosti ispumpanih količina i

J_{NVP} – kriterijum razlike proračunskih i osmotrenih vrednosti nivoa podzemnih voda.

Imajuću u vidu da su kriterijumi srazmerni razlici između proračunskih i osmotrenih vrednosti, cilj optimizacioni problem kalibracije se može definisati kao minimizacija ova dva kriterijuma:

$$\min\{J_V(x), J_{NVP}(x)\} \quad (1)$$

$x \in X$

gde se sa X označava skup prihvatljivih vrednosti parametara.

Računanje odstupanja u nivou se vrši za svaki vremenski trenutak u kome postoji osmotrena vrednost za posmatrani pijeometar. Zbog neredovnosti merenja na pijeometrima, neophodno je računске vrednosti dobiti u trenucima kada postoje merenja. Svođenje rezultata modela na trenutke u kojima postoje merenja vrši se linearnom interpolacijom između dve najbliže računске vrednosti.

Odstupanje proračunskih vrednosti na lokaciji jednog pijeometra se računa kao prosek apsolutnih razlika osmotrenih i proračunskih vrednosti

$$E = \frac{\sum_{k=1}^N |H_k^O - H_k^P|}{N} \quad (2)$$

pri čemu su:

N – broj merenja na posmatranom pijeometru,

H_k^O – k-ti osmotreni nivo podzemnih voda na pijeometru,

H_k^P – proračunska vrednost nivoa podzemnih voda koja odgovara k-tom osmotrenom nivou podzemnih voda na pijeometru.

19. Savetovanje SDHI i SDH - Beograd, Srbija 2021. Conference SDHI & SDH - Belgrade, Serbia 2021.

Kriterijum slaganja proračunskih i osmotrenih vrednosti nivoa podzemnih voda računa se kao prosek odstupanja proračunskih od osmotrenih vrednosti na svakom piježometru

$$J_{NVP} = \frac{\sum_{j=1}^M E_j}{M} \quad (3)$$

pri čemu je M broj piježometara.

U svakom koraku proračuna računa se odstupanje proračunske od osmotrene vrednosti E_j . Ukoliko se proračunska vrednost nalazi između dve granične serije, usvaja se da proračunska vrednost ne odstupa od osmotrene. Ukoliko je u posmatranom trenutku proračunska vrednost ispod donje granične serije, odstupanje proračunske vrednosti se računa u odnosu na osmotrenu vrednost sa donje granične serije. U slučaju da se u posmatranom trenutku proračunska vrednost nalazi iznad gornje granične krive, odstupanje se računa u odnosu na osmotrenu vrednost sa gornje granične serije.

Kriterijum slaganja proračunskih i osmotrenih vrednosti protoka na crpnim stanicama računa se kao prosek odstupanja u svim koracima

$$J_V = \frac{\sum_{i=1}^N E_i}{N} \quad E_i = \begin{cases} V_i^P \leq DG_i & E_i = |DG_i - V_i^P| \\ DG_i \leq V_i^P \leq GG_i & E_i = 0 \\ V_i^P \geq GG_i & E_i = |GG_i - V_i^P| \end{cases} \quad (4)$$

pri čemu su:

N – broj proračunskih koraka,

E_i – apsolutna razlika u i -tom koraku,

DG – donja granična serija,

GG – gornja granična serija,

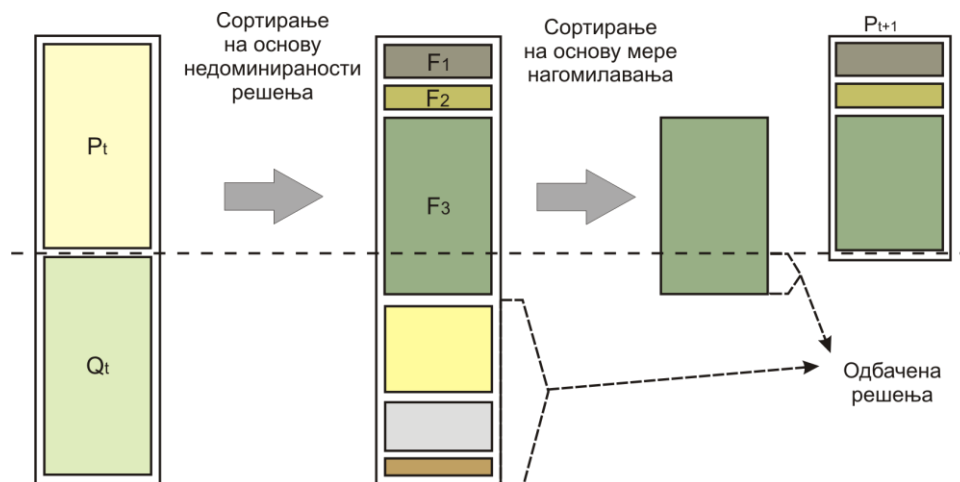
V_i^P – računaska vrednost u i -tom koraku.

6 Rešavanje optimizacionog problema kalibracije primenom paralelnog NSGA-II algoritma

NSGA-II je skraćenica za Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, to jest genetski algoritam zasnovan na sortiranju na osnovu nedominiranosti rešenja. Brzo sortiranje populacije jedinki po skupovima nedominiranih rešenja i poredbeni operator zasnovan na meri rastojanja do nagomilavanja su specifičnosti ovog algoritma.

NSGA-II koristi fiksiranu veličinu populacije N . Na početku se kreira populacija slučajno odabranih roditelja P_0 i sortira po nedominiranim frontovima. Svakom rešenju se dodeljuje vrednost stepena prilagođenosti koji je jednak nivou nedominacije tog rešenja. Pod pretpostavkom da treba minimizovati funkcije cilja, nivo 1 je najbolji i njemu pripadaju rešenja koja nisu dominirana, i kojima se dodeljuje stepen prilagođenosti 1, nivou 2 pripadaju rešenja koja dominira jedno rešenje, i tako redom. Da bi se formirala populacija potomaka Q_0 veličine N , koriste se operatori turnirske selekcije, simuliranog binarnog ukrštanja i polinomne mutacije. Elitizam se uvodi kroz poređenje trenutne populacije sa prethodno pronađenim najboljim nedominiranim rešenjima, tako da se nakon početne populacije procedura pronalaženja narednih generacija razlikuje. U generaciji t od roditeljske populacije P_t kreira se populacija potomaka Q_t veličine N i u populaciji $R_t = P_t \cup Q_t$, veličine $2N$ se za svako rešenje određuje rang koji je jednak nivou nedominacije datog rešenja. S obzirom na to da se rangiranje vrši nad roditeljskom i populacijom potomaka zajedno, elitna rešenja iz roditeljske populacije se prenose i u narednu generaciju. Nakon određivanja nedominiranih frontova F_1, F_2, \dots, F_R prelazi se na formiranje naredne populacije P_{t+1} . Ona se prvo popunjava rešenjima iz fronta F_1 , zatim iz fronta F_2 i tako redom. Pošto populacija R_t sadrži $2N$ rešenja, u populaciju P_{t+1} se ne mogu preneti rešenja iz svih frontova. Neka je F_{l-1} poslednji front iz koga su sva rešenja postala deo populacije P_{t+1} , i neka bi dodavanjem svih rešenja iz fronta F_l u populaciju P_t bila premašena fiksirana veličina populacije N . Tada se na front F_l primenjuje sortiranje po rastojanju do nagomilavanja u

opadajućem poretku i onoliko najboljih rešenja dobijenih ovim poretkom, koliko je potrebno da bi buduća populacija imala N jedinki, uključuje se u buduću populaciju. Ostala rešenja iz R_t koja nisu mogla biti preneti u narednu generaciju, bivaju obrisana. Ovaj postupak je ilustrovan na Slici 4. Nad populacijom P_{t+1} se dalje vrši selekcija, ukrštanje jedinki i mutacija kako bi bila dobijena nova populacija potomaka Q_{t+1} .



Slika 4. Skica NSGA-II algoritma.

Figure 4. NSGA-II algorithm.

Kao što je ranije napomenuto, prostorni domen Pančevačkog rita je po vertikali podeljen na dva sloja proračunskih elemenata, pri čemu je svaki sloj sadržao oko 1,5 miliona elemenata veličine 25x25 metara. Imajući u vidu da NSGA-II algoritam zahteva veliki broj proračuna, za potrebe kalibracije je zbog računске efikasnosti usvojen model sa mesečnom vremenskom diskretizacijom, nakon što je prethodno utvrđeno da rezultati koje on daje ne odstupaju značajno od modela sa dnevnim korakom. Ovako formiran model je za izračunavanje u programskom paketu MODFLOW zahtevao oko 4 GB radne memorije i trajao je od 1-2 sata u zavisnosti od vrednosti zadatih parametara i performansi računara na kome je izvršavan. Iz navedenih metrika je jasno da bi hiljade proračuna, koje NSGA-II zahteva za evaluaciju raznih varijanti rešenja, bilo nemoguće izvršiti na jednoprocorskim računarima u razumnom vremenskom roku. Iz toga razloga je za potrebe kalibracije korišćena platforma za primenu NSGA-II algoritma (JARE), koji omogućava paralelno izvršavanje većeg broja evaluacija u distribuiranom računarskom okruženju.

7 Platforma za primenu paralelnog NSGA-II algoritma

Metodologija opisana u prethodnom poglavlju je implementirana kroz module i servise centralnog proračunskog servera, koji od korisnika skrivaju detalje implementacije, što omogućava korišćenje servisa bez poznavanja teorije optimizacije i tehnika računarstva visokih performansi.

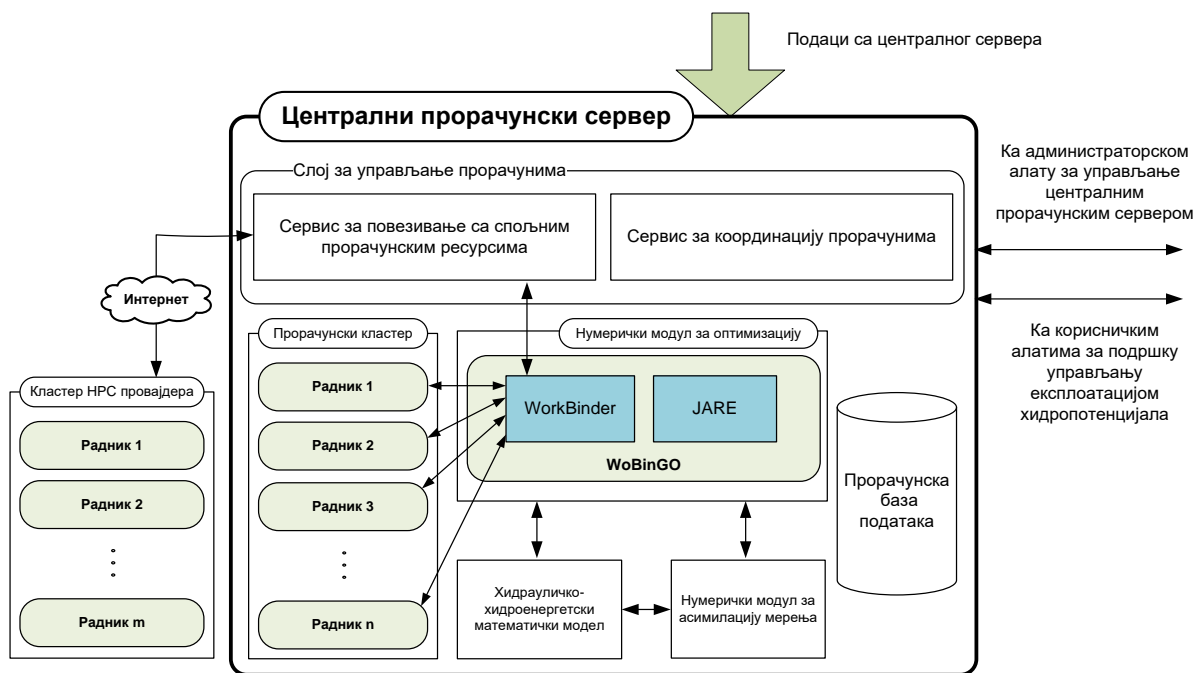
Na Slici 5 je prikazana detaljnija struktura modula i servisa centralnom proračunskog servera koji učestvuju u optimizacionim procesima, i to su:

- Numerički modul za optimizaciju – sadrži WoBinGO softverski okvir za paralelno izvršavanje evolucionih optimizacionih algoritama, koji uključuje:
 - JARE biblioteke evolucionih algoritama;
 - Work Binder - softverske komponente za elastičnu alokaciju distribuiranih računarskih resursa.
- Servis za koordinaciju proračunima - JARE Service.

- Servis za povezivanje sa spoljnim proračunskim resursima - softverske komponente za alokaciju spoljnih distribuiranih računarskih resursa.
- Proračunski klaster – hardversko/softverska platforma koja obezbeđuje radnike koji vrše pojedinačne evaluacije.

Optimizacionim procesima na centralnom proračunskom serveru upravljaju moduli administratorskog alata za upravljanje centralnim proračunskim servisima, i to su:

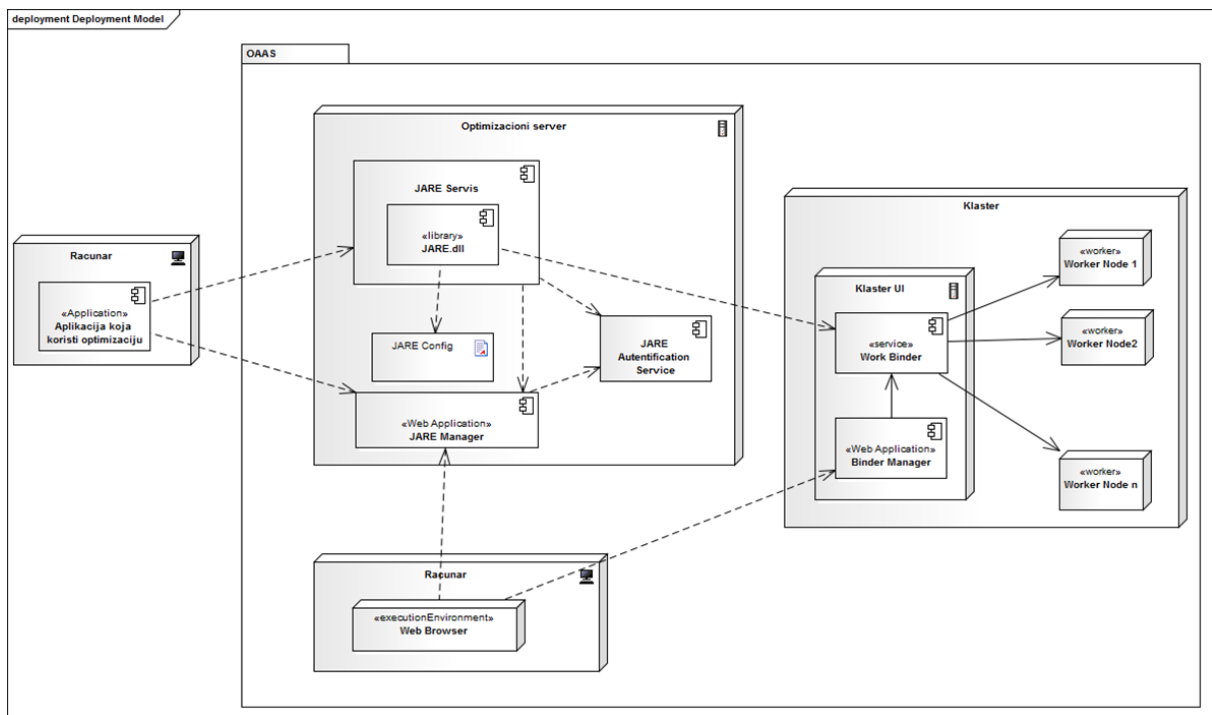
- JARE Manager – modul za monitoring i upravljanje optimizacionim procesima;
- Binder Manager – modul za monitoring i upravljanje Work Binder servisom.



Slika 5. Arhitektura numeričkog modula za optimizaciju.

Figure 5. Architecture of numerical module for optimisation.

Korišćenjem JARE servisa, korisnik definiše optimizacioni problem i pokreće proces optimizacije (Slika 6). Izvršavanje samog optimizacionog procesa je prepušteno WoBinGO softverskom okviru, koji od korisnika skriva detalje vezane za primenjenu optimizacionu metodu i hardver na kome se proračun izvršava. Korisnik prati tok optimizacionog procesa pomoću administratorskog alata za upravljanje centralnim proračunskim serverom preko JARE Manager modula, dok se kapacitetima hardverske infrastrukture može upravljati pomoću Binder Manager modula.



Slika 6. Dijagram raspoređivanja komponenti servisa za optimizaciju.

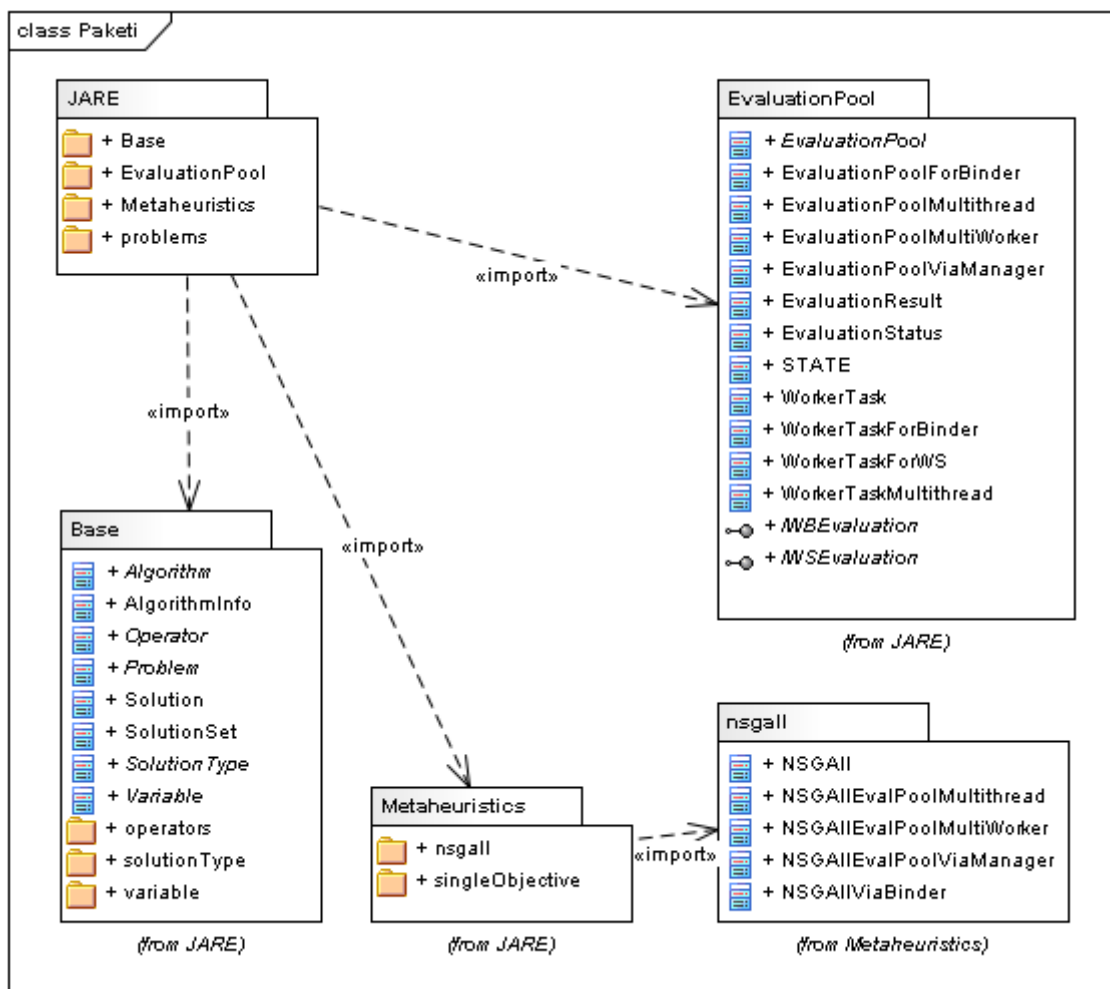
Figure 6. Optimisation service components deployment.

7.1 JARE biblioteka evolucionih algoritama

Osnovu numeričkog modula za optimizaciju čini biblioteka za višekriterijumsku optimizaciju *JARE*. *JARE* je objektno-orijentisana biblioteka klasa razvijena korišćenjem *.NET C#* jezika, koja pruža fleksibilnu i nadgradivu kolekciju evolucionih algoritama i pratećih komponenti neophodnih za njihovu realizaciju.

JARE se sastoji od nekoliko paketa klasa od kojih su najbitniji (Slika 7):

- *Base*. Sadrži osnovne klase za rad sa evolucionim algoritmima, kao što su klase za predstavljanje optimizacionih algoritama, problema, rešenja (jedinki), operatora (selekcija, ukrštanje, mutacija,...), i slično.
- *Metaheuristics*. Sadrži pakete klasa koje implementiraju različite metaheuristike za rešavanje problema optimizacije uključujući i implementaciju *NSGA-II* evolucionog algoritma za višekriterijumsku optimizaciju.
- *EvaluationPool*. Ovaj paket sadrži klase neophodne za realizaciju distribuirane evaluacije jedinki na višeprosorskim računarima, računarskim klasterima i Grid infrastrukturi.

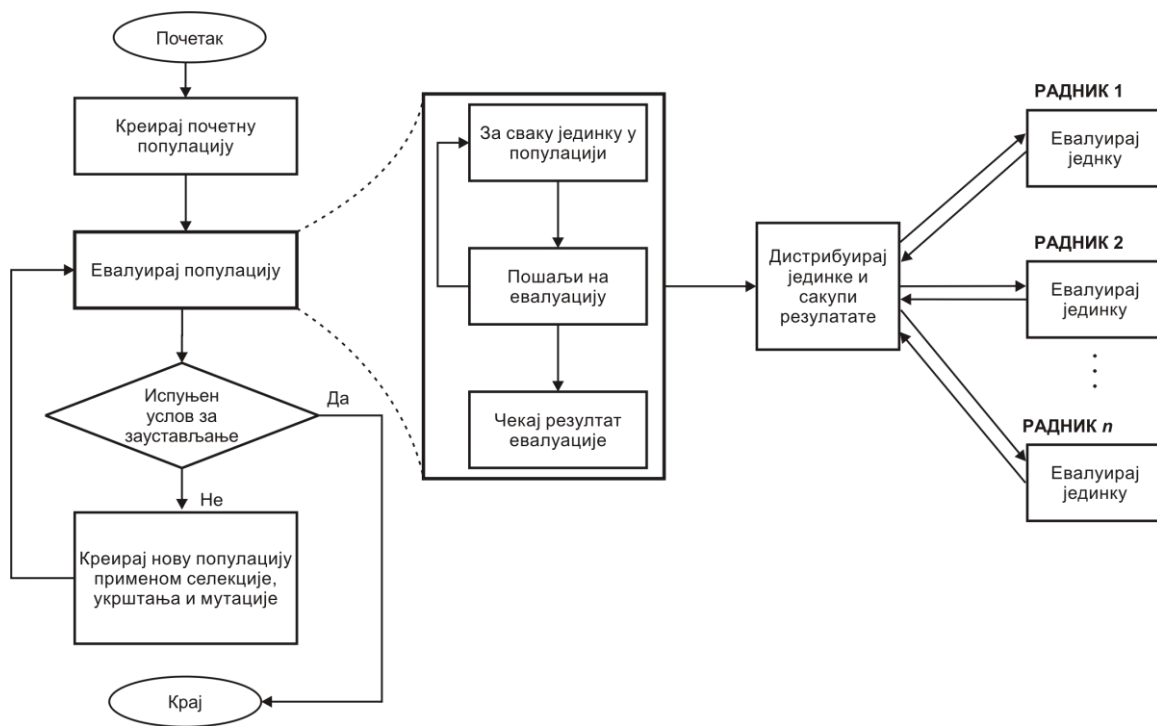


Slika 7. Osnovni paketi JARE biblioteke klasa

Figure 7. Main packages of JARE class library.

7.2 WoBinGO softverski okvir i Work Binder

Za čitav proces distribuirane evaluacije jedinki na računarskom klasteru brine se WoBinGO softverski okvir [6]. WoBinGO potpuno oslobađa korisnike brige o specifičnim detaljima distribuiranog računarstva, i obezbeđuje brz pristup resursima računarskih klastera. On vrši automatsku, elastičnu alokaciju distribuiranih resursa, koristeći ono što je trenutno dostupno, ali zauzima i dodatne resurse čim postanu slobodni. Upotrebom gospodar-sluga modela paralelizacije GA, evaluacija jedinki je potpuno odvojena od ostatka algoritma, čime se obezbeđuje da evaluator može biti napisan u bilo kom kompajlerskom ili skript jeziku. Kao što se može uočiti sa Slike 8, gospodar izvršava evolucionu petlju u glavnoj niti sve do trenutka kada treba evaluirati generaciju. U fazi evaluacije populacije jedinki, svaka jedinka se asinhrono prosleđuje *pool*-u za evaluaciju koji je realizovan kroz klasu *EvaluationPoolForBinderTPL* biblioteke *JARE*. Nakon što su sve jedinke evaluirane, i dodeljena im je vrednost funkcije cilja, gospodar nastavlja sa izvršavanjem ostatka algoritma sve dok uslov za zaustavljanje ne bude zadovoljen. *Pool* za evaluaciju ima ulogu srednjeg sloja između gospodara i Work Binder servisa. On obezbeđuje asinhronu paralelne evaluacije individua iz jedne generacije tako što pokreće posebnog Work Binder klijenta za svaku od jedinki koje čekaju u redu za evaluaciju. Kada je jedinka evaluirana, *pool* za evaluaciju od Work Binder klijenta dobija rezultat i posmatranoj jedinki dodeljuje vrednost funkcije cilja.



Slika 8. Algoritam i tok podataka prilikom distribuirane evaluacije jedinki.

Figure 8. Algorithm and data flow during distributed evaluation of individuals.

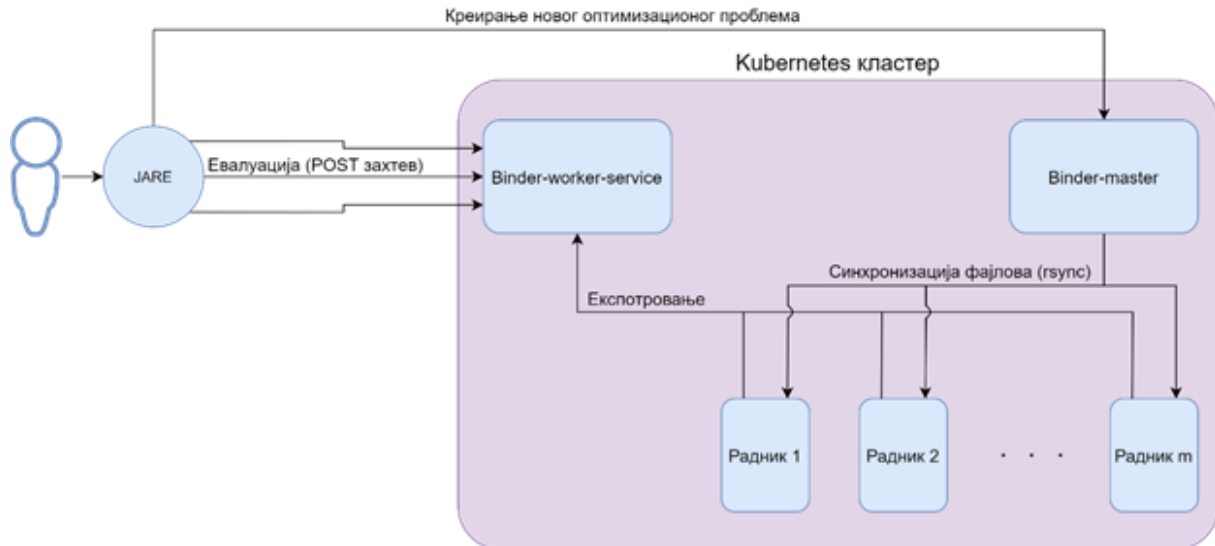
Work Binder servis obezbeđuje gotovo trenutni pristup distribuiranim resursima i povećava njihovu iskorišćenost tako što ih zauzima automatski i elastično, u zavisnosti od trenutnog i nedavnog ponašanja klijenata. Kada se klijent obrati Work Binder-u tražujući uslugu radnika, servis povezuje spremne radnike sa klijentima koji zahtevaju evaluaciju. Klijent preko Work Binder servisa, koji ima ulogu proksija na relaciji klijent-radnik, radniku šalje jedinku, radnik izračunava vrednost funkcije cilja za tu jedinku i kroz Work Binder proksi šalje rezultat natrag klijentu. Ovaj servis može dinamički da alokira i spoljne proračunske resurse preko HPC provajdera i servisa za povezivanje sa spoljnim proračunskim resursima. Za ovo je preduslov postojanje ugovora sa HPC provajderom i stabilne i brze komunikacije sa proračunskim resursima tog provajdera.

7.3 JARE Service

JARE Service je WCF servis hostovan od strane Windows servisa. JARE servis omogućava sledeće: (1) definisanje novog optimizacionog problema, (2) izvršavanje algoritama za optimizaciju nad definisanim problemima, (3) praćenje i kontrolisanje optimizacionih procesa, (4) nadgledanje i analizu dobijenih rezultata. Definisanje novog optimizacionog problema podrazumeva određivanje broja kriterijuma optimizacije, zatim broja i tipa promenljivih parametara optimizacije i njihovih opsega, te odabira evolucionog algoritma i njegovih parametara. Dodatno, potrebno je obezbediti evaluator koji će vršiti ocenjivanje kvaliteta potencijalnih rešenja. Evaluator se daje u formi običnog ZIP paketa koji sadrži izvršni fajl ili fajlove i podatke potrebne za ocenjivanje stepena prilagođenosti rešenja.

Optimizacije su izvršavane na Kubernetes klasteru sa sedam čvorova (računara). Svaki od računara poseduje Intel Xeon E5-2683 v4 @ 2.10GHz procesor koji ima 32 logička jezgra i 128 GB radne memorije. Čvorovi su međusobno povezani 10Gbps mrežom. Prosečno vreme koje je bilo potrebno za evaluaciju jedne jedinke je 5900 s, pri čemu je svaka evaluacija zahtevala oko 4 GB radne memorije. Za potrebe distribuiranog izvršavanja optimizacije je podignuto 100 radnika (Slika 8), što je omogućilo istovremenu evaluaciju 100 jedinki. Prosečna dužina trajanja evaluacije cele generacije od 100 jedinki je bila 6500 s, pri čemu je trošeno oko 400 GB radne memorije. Imajući u vidu da bi za

evaluiranje jedne generacije od 100 jedinki na jednom procesoru bi bilo potrebno oko 7 dana, odnosno više od godinu dana za čitavu kalibraciju, na ovaj način je postignuta skoro stostruka ušteda u vremenu sprovođenja postupka kalibracije.



Slika 9. Arhitektura rešenja za optimizaciju genetskim algoritmom u distribuiranom računarskom okruženju.

Figure 9. Architecture of genetic algorithm optimization solutions in a distributed computing environment.

8 Rezultati

Sprovedenim hidrodinamičkim proračunima u sklopu procesa kalibracije matematičkog modela došlo se do reprezentativnih parametara vodonosne sredine (koeficijenti filtracije definisanih slojeva), vodnih tokova (konduktanse spoljnih reka i unutrašnje kanalske mreže), kao i do vrednosti parametara bilansa režima voda. Prikaz sumarnog protoka na pumpnim stanicama na prostoru Pančevačkog rita dat je na Slici 10.

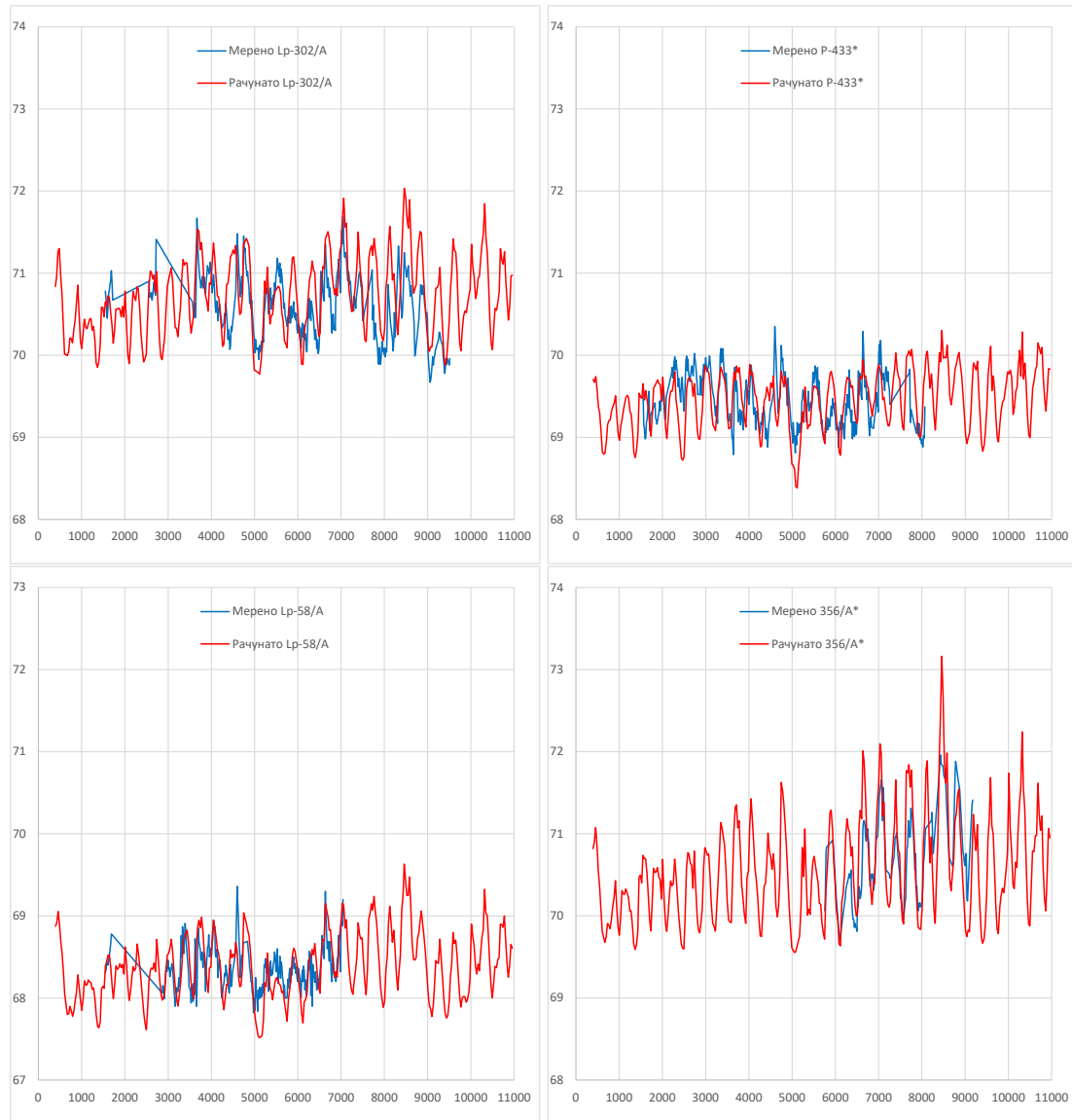


Slika 10. Poređenje sumarnog protoka na svih sedam pumpnih stanica

Figure 10. Comparison of total flow on all seven pumping stations

19. Savetovanje SDHI i SDH - Beograd, Srbija 2021. Conference SDHI & SDH - Belgrade, Serbia 2021.

Verodostojnost modela, odnosno njegova reprezentativnost posle procesa kalibracije verifikuju se preko razlike osmotrenih i izračunatih vrednosti pijezometarskih nivoa na kontrolnim pijezometrima. Prikaz poklapanja proračunatih i merenih vrednostima pijezometarskih nivoa dat u nastavku za odabrane objekte na području rita, Slika 11.



Slika 11. Oscilacije nivoa podzemnih voda u prirodi i u modelu na odabranim pijezometrima

Figure 11. Observed and modelled groundwater level changes on piezometers

Na osnovu prikazanih dijagrama moguće je konstatovati da je postignuto zadovoljavajuće poklapanje računatih i merenih vrednosti pijezometarskih nivoa.

Implementacija genetskog algoritma prezentovana u ovom radu je donela skraćanje vremena potrebnog za kalibraciju složenog modela podzemnih voda eliminisanjem uobičajenog postupka koji bi se zasnivao na brojnim pokušajima i greškama.

Literatura

1. Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ (2020), Studija uređenja voda na području Pančevačkog rita.
2. Stojanović, B., Milivojević, N., Ivanović, M., Divac, D. (2014), Dot Net Platform for Distributed Evolutionary Algorithms with Application in Hydroinformatics, *Handbook of Research on High Performance and Cloud Computing in Scientific Research and Education*, IGI Global
3. Madsen, K., Perry, A.E. (2010), Using Genetic Algorithms on Groundwater Modeling Problems in a Consulting Setting, *Proceedings of the Annual International Conference on Soils, Sediments, Water and Energy*, Vol. 15
4. Eryiğit, M. (2021), Estimation of parameters in groundwater modelling by modified Clonalg, *Journal of Hydroinformatics*, 23 (2): 298–306
5. Harbaugh, A.W. (2005), MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model -- the Ground-Water Flow Process: *U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16*.
6. Ivanovic, M., Simic, V., Stojanovic, B., Kaplarevic-Malistic, A., and Marovic, B. (2015), Elastic grid resource provisioning with WoBinGO: A parallel framework for genetic algorithm based optimization, *Future Generation Computer Systems*, 42(0), pp.44 – 54.