

METODOLOGIJA PREDIKCIJE REŽIMA PODZEMNIH VODA U USLOVIMA UREĐENJA PROSTORA NA LEVOJ OBALI DUNAVA U NOVOM SADU

Vladimir LUKIĆ, Goran JEVIĆ, Milenko PUŠIĆ, Vesna TRIPKOVIĆ
Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ Beograd

REZIME

Leva obala Dunava u delu Novog Sada, u zoni Kameničke ade i Ribarskog ostrva, u postojećem stanju predstavlja nebranjeno područje, hidrotehnički neuređeno i neurbanizovano. Savremene tendencije u razvoju gradova podrazumevaju izlazak na obale reka i njihovo korišćenje u višenamenske svrhe. Za područje leve obale Dunava u zoni Kameničke ade i Ribarskog ostrva predviđeno je pomeranje postojeće odbrambene linije nasipa ka koritu Dunava za oko 500 m. Uređenje na ovaj način formiranog branjenog područja, u skladu je sa definisanom projektnom dokumentacijom, podrazumeva formiranje veslačke staze umesto postojećeg dunavca Šodroš. Konceptija formiranja veslačke staze podrazumeva da ona bude u direktnom hidrauličkom kontaktu sa vodonosnom sredinom a i da bude sa konstantnim održanim nivoom vode. Na taj način se obezbeđuje njena hidraulička uloga kao regulatora režima podzemnih voda na datom prostoru. U sklopu formiranja Generalnog urbanističkog plana za ovaj prostor, bilo je neophodno sagledati uticaj predloženih izmena na promenu režima podzemnih voda. Za potrebe sagledavanja uticaja planiranih radova na izmenu režima podzemnih voda formiran je hidrodinamički model strujanja podzemnih voda za dato područje sa ciljem da se definiše i na inženjerski prihvatljiv način kvantifikuju promene, koje bi se dogodile. Shodno tome, izvršeno je formiranje, kalibracija i verifikacija hidrodinamičkog modela, na kome su, za definisane proračunske šeme, izvršeni prognozni proračuni. Upoređenjem rezultata proračuna, dobijenih za postojeće stanje, sa rezultatima za projektovano stanje, sagledan je i kvantifikovan uticaja

izmena na prostoru na režim podzemnih voda. Obradom dobijenih rezultata je utvrđeno da pomeranje nasipa ka Dunavu nema znatan uticaj na režim podzemnih voda. Izgradnjom veslačke staze sa datim premisama, ostvario bi se pozitivan uticaj na režim podzemnih voda na datom području. U uslovima visokih vodostaja Dunava, veslačka staza bi se ponašala kao dren koji sakuplja višak podzemnih voda, dok bi u uslovima niskih vodostaja i niskih nivoa podzemnih voda nalivala vodonosnu sredinu i time nadoknadila deficit vode.

Ključne reči: podzemne vode, režim, prognoza, hidrodinamički modeli

1. UVOD

Grad Novi Sad se prostire na levoj i desnoj obali Dunava. Leva obala je zaravnjena i predstavlja deo aluvijalne ravni Dunava, dok se desna obala naglo uzdiže prema obroncima Fruške Gore. Uvažavajući savremene tendencije u razvoju gradova, intencija Novog Sada je izlazak na obale reke. Imajući u vidu konfiguraciju terena i zauzetost prostora, izabrano je da se za ove namene iskoristi i prostor Kameničke ade i Ribarskog ostrva. Kako bi se dati prostor praveo nameni, neophodno je izvršiti hidrotehničko uređenje terena u cilju postizanja zadate funkcionalnosti. Hidrotehničko uređenje prostora Kameničke ade i Ribarskog ostrva sa pripadajućim brodogradilištem, podrazumeva [5]:

1. formiranje nove linije nasipa, bliže minor koritu Dunava, čime se okružuje branjeni teren Kameničke ade,
2. preoblikovanje i prenamena rukavca Šodroš u veslačku stazu, fizički odvojenu od Dunava, a hipsometrijski i hidraulički povezanom sa vodonosnom poroznom sredinom (izdani),
3. nasipanje terena, koje je dato u dve varijante:
 - a. u prvoj, sa generalnim podizanjem kote celog terena, pri čemu se postiže kompletna odbrana od visokih nivoa podzemnih voda, bez potrebe dodatnih mera njihovog snižavanja,

Podaci o prihvatanju članka

Primljen: 19.10.2024.

Ispravljen: -

Prihvaćen: 29.10.2024.

Kontakt: vladimir.lukic@jcerni.rs

- b. drugoj, sa lokalnim nasipanjem, pri čemu je potrebno preduzeti odgovarajuće mere za odbranu od visokih nivoa podzemnih voda.

U sinergiji uticaja pomenutih elemenata, planirana veslačka staza je najvažnija i najkompleksnija, jer predstavlja polje sportskih i rekreativnih aktivnosti, a u isto vreme, preko održavanog vodostaja, diktira i režim podzemnih voda u široj zoni Kameničke ade. Pretpostavka za to je dobar fizički kontakt (dna) sa vodonosnom sredinom, kao i dobra hidraulička veza sa izdani (podzemnim vodama).

Veslačka staza generalno ima drenažnu ulogu, što obezbeđuje i vodozamenu i održavanje čiste (podzemne) vode u njoj tokom većeg dela godine. Nije zanemarljiva njena pozitivna uloga na (niže) nivoe podzemnih voda u priobalnim zonama naselja Telep i Adice. Za potrebe sagledavanja potencijalnih uticaja na režim podzemnih voda, sagledani su geološko-hidrogeološke karakteristike terena, režim podzemnih voda u istorijskim i sadašnjim uslovima, a sprovedenom hidrodinamičkom analizom izvršena je simulacija režima podzemnih voda u izmenjenim (projektovanim) uslovima. Simulacija režima podzemnih voda u projektovanim uslovima izvršena je za uslove predviđenih izmena sa različitim varijantnim rešenjima zaštite područja, pri različitim hidrološkim uslovima, odnosno različitim nivoima reke Dunav. Poređenjem dobijenih rezultata u sadašnjem i projektovanom stanju došlo se do kvantifikacije intenziteta uticaja na režim podzemnih voda na širem području.

2. KONCEPCIJA REŠAVANJA

Pomeranjem nasipa oko 500 m ka koritu Dunava, i formiranjem veslačke staze na novoformiranom branjenom području doći će do neosporne izmene režima podzemnih voda. Simulacionim proračunima na

hidrodinamičkom modelu, za definisane proračunske šeme (scenarije uređenja prostora) potrebno je sagledati i kvantifikovati ove uticaje.

Imajući u vidu kompleksnost problema koji se rešava i moguće uticaje na gradsko jezgro koje se nalazi u zaleđu datog područja, koncepcija rešavanja je podrazumevala sveobuhvatno sagledavanje problematike sa ciljem da se:

- na osnovu analize i neophodne reinterpretacije svih raspoloživih podataka i podloga formira hidrogeološki, a zatim i hidrodinamički model strujanja podzemnih voda na širem području Kameničke ade,
- izvrši kalibracija modela kao i sagledavanje uticaja dejstvujućih faktora,
- na kalibrisanom modelu se sprovede simulacija režima podzemnih voda na području u uslovima uređenja terena uz primenu odgovarajućih tehničkih mera (nasipanje, izgradnja drenažnih sistema, izgradnja veslačke staze),
- po završetku varijantne analize režima podzemnih voda u projektovanim uslovima izvrši upoređenje dobijenih rezultata, a zatim kvantifikuju uticaji.

Prema prikazanoj metodologiji neophodno je da se serijom hidrodinamičkih proračuna izvrši simulacija režima podzemnih voda u projektovanim uslovima, za različita hidrološka stanja i da se na osnovu sprovedenih proračuna sagledaju i kvantifikuju potencijalni uticaji na režim podzemnih voda na širem području Kameničke ade.

3. PROSTORNI OBUHVAT

Analizirani teren se u širem smislu sastoji iz četiri celine: prostora Kameničke ade i Ribarskog ostrva (od većeg interesa), naselja Kamenjar i gradskog tkiva u priobalju (Adice i južni Telep), slika 1, [5].



Slika 1. Pregledna karta šire zone Kameničke ade

Istorijski gledano, prostor Kameničke ade je inundaciono područje, u čijem se zaleđu nalazi nasip, koji štiti grad od visokih nivoa Dunava. Teren se periodično plavi, a morfologija reljefa je dosta neujednačena, sa jarugama i uskim uzvišenjima. Područje je kompletno obraslo gustom, neprohodnom šumom.

Nasipanjem terena, neposredno uz obalu reke, znatno je izmenjen hidrološko-hidraulički režim podzemnih voda Kameničke ade. Do povremenog plavljenja terena dolazi, ali sad sa prodorom voda Dunava kroz postojeću vezu reke i rukavca (Šodroš) u unutrašnjosti. Obzirom da je najveći deo područja u nebranjenoj zoni, sistem za zaštitu od unutrašnjih voda nije formiran.

4. OPŠTE GEOLOŠKE KARAKTERISTIKE ŠIREG PROSTORA KAMENIČKE ADE

Područje Kameničke ade i Ribarskog ostrva predstavlja deo aluvijalne ravni Dunava, formirane eroziono-akumulacionim procesima ove reke. Originalne kote terena se kreću u rasponu od 74 do 81 mm, mada je originalna morfologija znatno izmenjena nekontrolisanim nasipanjem terena refuliranim peskom u visini od 1 do 5 m. Geološku građu terena šireg područja čine sedimenti neogene i kvartarne starosti. U pleistocenu su formirane Dunavske rečne terase (t_1 i t_2), facije kopnenog lesa i proluvijalno-deluvijalni sedimenti (dpr). Holocenu pripadaju sedimenti aluvijuma i to facije korita (ak), povodnja (ap) i starača (am) koji se javljaju na površini terena u zoni Kameničke ade, izvorišta „Štrand“ i „Ratnog ostrva“ [6].

Srednji do krupnozrni šljunkovi i sivi srednjezrni peskovi grade donje delove profila aluvijalne ravni facije korita. Liskunoviti alevritični peskovi i peskoviti alevriti su zastupljeniji u povodanjskoj faciji. Facija starača je predstavljena organobarskim peskovima, alevritima i glinama sa alevritičnom komponentom.

Najpliću vodonosnu sredinu na širem prostoru Kameničke ade (u okviru koje je formirana „prva“ izdan) čine peskovi i šljunkovi holocena i gornjeg pleistocena. Prosečna dubina do podine vodonosne sredine je od 13 do 15 m na prostoru Kameničke ade, a ka severu se povećava na 20 do 22 m. Paketu holocenske starosti pripada i površinski slabije propusni sloj (tzv. povlata vodonosne sredine) u čijem su sastavu dominantno prašine i peskovi (pretežno sitnozrne granulacije), sa promenljivim procentualnim učešćem frakcija gline.

5. HIDROGEOLOŠKE KARAKTERISTIKE ŠIREG PROSTORA KAMENIČKE ADE

Vodonosna sredina od primarnog interesa za analizu zaštite prostora Kameničke ade od visokih nivoa podzemnih voda predstavljena je aluvijalnim peskovito-šljunkovitim sedimentima kvartarne starosti [6].

Prema mehaničkom sastavu i filtracionim karakteristikama, u okviru vodonosne sredine se generalno mogu izdvojiti dve celine: donja, predstavljena peskovitim šljunkovima i gornja, od peskovitih deponata. Procentualni odnos učešća peska i šljunka je promenljiv kako u planu, tako i u profilu. Bočne promene litološkog sastava uslovile su lokalnu nehomogenost i anizotropnost, što se odrazilo i na neujednačenost filtracionih karakteristika. Vrednosti koeficijenta filtracije, proračunati na osnovu podataka o granulometrijskom sastavu uz primenu empirijskih formula i obradom podataka opita crpenja sprovedenih na bunarima starog izvorišta na Kameničkoj adi su reda veličine $n \cdot 10^{-5}$ do $n \cdot 10^{-3}$ m/s, sa reprezentativnom vrednošću koeficijenta filtracije vodonosne sredine od $k = (2-3) \cdot 10^{-4}$ m/s. Koeficijenti filtracije povlatnog slabije propusnog sloja su reda $k = n \cdot 10^{-6}$ m/s – $n \cdot 10^{-7}$ m/s, dok su laporovite gline podine sa znatno slabijim filtracionim karakteristikama, $k = n \cdot 10^{-8}$ m/s. Navedeni parametri su reprezentativni za šire područje izvorišta „Štrand“, „Petrovaradinska ada“ i „Ratno ostrvo“, kao i za područja izvorišta koja više nisu u radu – „Adice“ i „Kamenička ada“. Kao početni korak za formiranje hidrodinamičkog modela strujanja podzemnih voda, sprovedena je šematizacija vodonosne sredine. Ovaj korak je izvršen pomoću interpretacije litološkog sastava i filtracionih karakteristika litoloških jedinica unutar zone od interesa. Prema preliminarnoj analizi, litološke jedinice od interesa za sagledavanje uticaja izmena na prostoru na režim podzemnih voda su policiklični aluvijalni sedimenti kvartarne starosti. Do razmatrane dubine od 20 m izdvojeni su sledeći litološki članovi:

- prašinasto peskoviti (glinoviti) sedimenti povlate vodonosne sredine,
- peskovite i peskovito-šljunkovite naslage vodonosne sredine i
- glinovito-prašinasto-peskovite naslage podine vodonosne sredine.

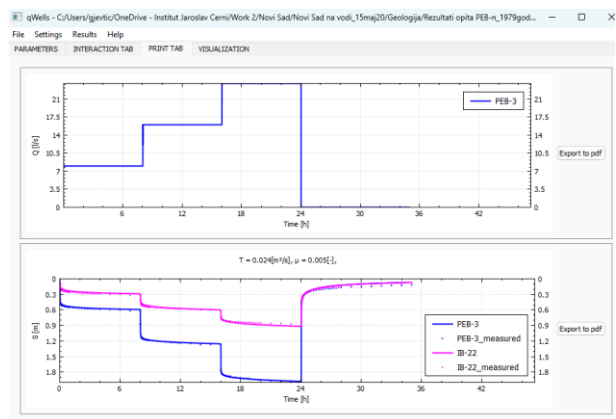
Peskovito-šljunkoviti deponati vodonosne sredine su dodatno rasčlanjeni na:

- peskovit sloj i
- peskovito šljunkoviti sloj.

Prilikom pomenute analize parametri za izdvajanje hidrogeoloških slojeva su bili:

- procentualno učešće zrna veličine d_{10} , d_{20} , d_{50} , d_{60} i d_{85} ,
- poroznost,
- koeficijent uniformnosti ($U=d_{60}/d_{10}$),
- koeficijent filtracije.

Za potrebe sprovođenja analiza mehaničkog sastava i proračuna koeficijenta filtracije na osnovu rezultata granulometrijskih analiza korišćen je namenski softver *qGrains*, razvijen u okviru Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi“. Proračuni koeficijenta filtracije na osnovu izvedenih opita crpenja su izvršeni takođe namenski razvijenim softverom u okviru Instituta, *qWells*, slika 2.



Slika 2. Prikaz obrade podataka opitnih crpenja u programskom paketu *qWells*

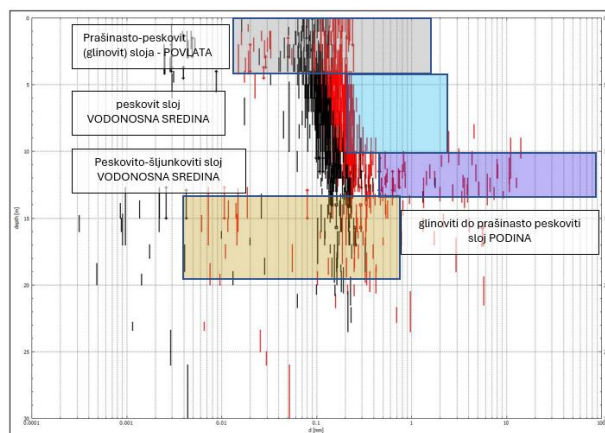
Na slici 3 je prikazana gradacija zrna prečnika d_{10} i d_{50} po dubini u funkciji kriterijuma za generalnu šematizaciju intervala litoloških jedinica (izlaz iz programa *qGrains*).

Na osnovu sprovedene analize mehaničkog sastava sedimenta, kao i izvršene obrade podataka opitnih crpenja došlo se do geometrije i filtracionih karakteristika definisanih hidrogeoloških celina:

- Povlatni prašinsto-peskovito-glinoviti sloj, prosečne debljine od 5 do 6 m, sa prosečnom vrednošću koeficijenta filtracije od $3 \cdot 10^{-5}$ m/s (opseg od $1 \cdot 10^{-4}$ do $1 \cdot 10^{-8}$ m/s, u zavisnosti od procentualnog učešća glinovite, prašinste i peskovite komponente),
- Peskovito-šljunkoviti deponati vodonosne sredine prosečne debljine od 14 do 16 m, sa prosečnom

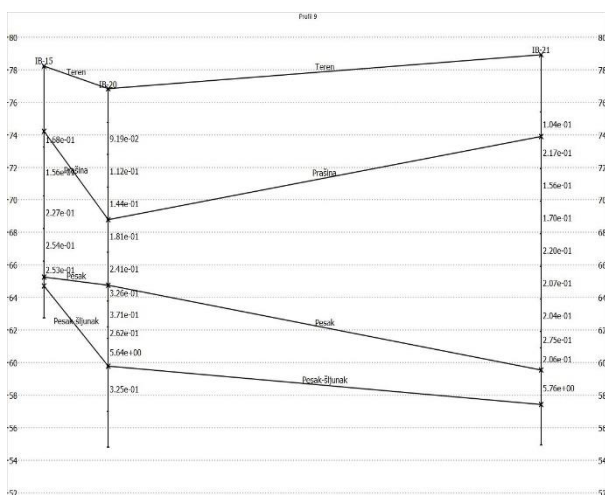
vrednošću koeficijenta filtracije za peskoviti deo kompleksa od $7 \cdot 10^{-5}$ m/s, dok za šljunkovito-peskoviti deo serije iznosi prosečno $2 \cdot 10^{-4}$ m/s.

- Podinski glinoviti do prašinsti deponati, predstavljaju vodonepropusnu barijeru sa koeficijentom filtracije reda $1 \cdot 10^{-9}$ m/s.



Slika 3. Prikaz promene veličine zrna d_{10} i d_{50} učestalosti pojavljivanja sa dubinom (izvor: *qGrains*), d_{10} crne linije i d_{50} crvene linije

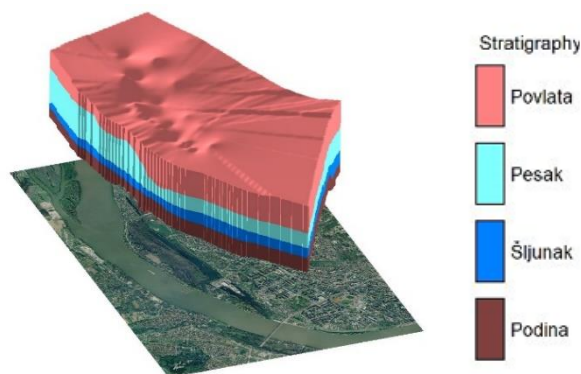
Kao dodatna analiza granica litoloških članova prema kriterijumu veličine zrna, a posledično i veličine koeficijenta filtracije, formirani su litološki profili, ukupno 13 profila u okviru programskog paketa *qGrains*, slika 4.



Slika 4. Jedan šematizovani litološki profil (izvor: *qGrains*)

Za potrebe konačne analize hidrogeološke građe i filtracionih karakteristika sredine, kao i za formiranje

konceptualnog (hidrogeološkog) modela, prikupljeni podaci raspoloživih bušotina na širem području Kameničke ade su pohranjeni u bazu podataka primenom komercijalnog softvera *RockWorks*. Formiranje baze podataka i konceptualnog (hidrogeološkog) modela se odvija kroz nekoliko koraka. U prvom koraku je izvršeno normiranje litoloških opisa kartiranih jedinica i definisanje reprezentativnog litološkog stuba sa 18 litoloških članova, kojima su prilagođeni svi originalni opisi litoloških karakteristika nabušenog sedimenta. Na osnovu definisanih litoloških članova vrši se formiranje litološkog modela. Analizom litoloških profila, postepeno se dolazi do reprezentativnog šematizovanog hidrogeološkog (stratigrafskog) stuba za potrebe izrade šematizovanog (numeričkog) modela strujanja podzemnih voda. Na osnovu analize svih raspoloživih podataka u *RockWorks* bazi, usvojena je šema strujanja podzemnih voda u porznoj sredini, predstavljena sa 3 kontinualna sloja. Gornji sloj je predstavljen slabopropusnom povlatom, dok je vodonosni sloj predstavljen sa dva sloja (pesak i šljunak). Podinski sloj je u hidrodinamičkom modelu vodonepropusna barijera. Po završetku procesa šematizacije dobijeni su 2D i 3D prikazi formiranih šematizovanih slojeva hidrogeološkog modela, slika 5.



Slika 5. 3D prikaz šematizovanog hidrogeološkog modela šire zone Kameničke ade

Za potrebe sagledavanja režima nivoa podzemnih voda, a kasnije i za potrebe kalibracije hidrodinamičkog modela prikupljeni su raspoloživi podaci o

osmatranjima nivoa podzemnih voda na području Kameničke ade.

6. HIDRODINAMIČKI MODEL STRUJANJA PODZEMNIH VODA

Prema usvojenoj metodologiji, za potrebe sagledavanja planiranih izmena na prostoru u funkciji hidrotehničkog uređenja, predviđeno je sprovođenje kompleksnih hidrodinamičkih proračuna na numeričkom modelu. Za potrebe sprovođenja hidrodinamičkih proračuna korišćen je komercijalni softver *MODFLOW Verzija 2005*, a kao interfejs za pre i post procesing podataka korišćen je takođe komercijalni softver *Groundwater Vistas verzija 8*.

Rešavanje postavljenog zadatka izvršeno je kroz nekoliko koraka:

- formiranje hidrodinamičkog modela,
- kalibracija i verifikacija formiranog modela,
- prognozni proračuni za različite proračunske šeme izmena na prostoru od interesa,
- analiza i interpretacija dobijenih rezultata.

U skladu sa usvojenom šematizacijom na hidrogeološkom (konceptualnom) modelu, strujanje na području od interesa je usvojeno kao prostorno, tako da su na modelu izdvojena 3 sloja, slika 6:

- povlatni – slabopropusni sloj,
- vodonosna sredina – peskoviti sloj i
- vodonosna sredina šljunkovito-peskoviti sloj

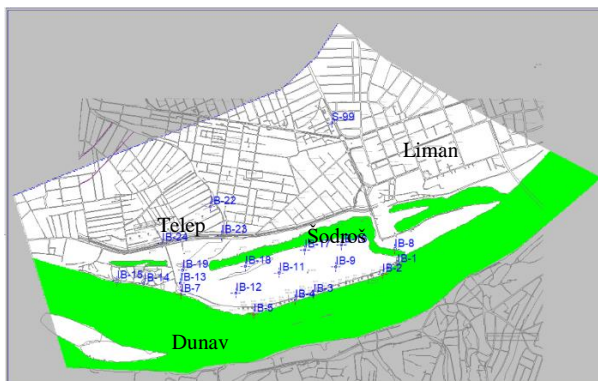
Planara podine šljunkovito-peskovitog sloja predstavlja vodonepropusnu barijeru, koja gornji hidrodinamički kompleks izoluje od dubljih podzemnih voda (izdani).

Osnovna matrica modela je pravougaonog oblika dimenzija stranica $X=6400$ m i $Y=4000$ m, što daje ukupnu površinu modela od $25,6$ km². Strujno polje je diskretizovano u planu mrežom kvadratnih polja homogene veličine $\Delta x=\Delta y=10$ m. Ovako diskretizovano strujno polje sadrži 400244 aktivnih ćelija, raspoređenih u 3 sloja. Za vremenski korak kalibracionih proračuna izabran je korak od 5 dana. Dispozicija modela u postojećim uslovima za potrebe kalibracije je prikazana na slici 7.



Slika 6. Šematski hidrodinamički profil istok-zapad preko modela Kameničke ade

Na ovako definisanom i postavljenom hidrodinamičkom modelu, izvršen je postupak njegove kalibracije. Za postupak kalibracije izabran je vremenski interval od 01.05.1979. do 30.04.1980. Ovaj period je iznuđen, obzirom da se samo za taj period raspolagalo podacima osmatranja nivoa podzemnih voda.



Slika 7. Dispozicija modela Kameničke ade u postojećim uslovima

Kalibracije je izvršena u dva sukcesivna koraka, pri čemu su rezultati prvog direktno uticali na realizaciju drugog. U prvom koraku je obavljena tzv. „ručna“ kalibracija, u toku koje su realizovani proračuni i preliminarna analiza osetljivosti rezultata na promene u konfiguraciji parametara koji se kalibrišu. Nove vrednosti parametara koji se menjaju zadaje sam modelar, uz pomoć tehnika sadržanih u korišćenom komercijalnom softveru.

U drugom koraku, kalibracija modela je nastavljena i završena automatskim procesom, korišćenjem savremenog softverskog okruženja (PEST).

Na osnovu izvršenih prethodnih hidrauličkih analiza, u sklopu pripreme za formiranje matematičkog modela, utvrđeno je da postoji doticaj u područje domena modela sa severa (iz pravca grada). Kvantifikacija doticaja u područje modela iz pravca severa predstavljala je problem, obzirom na nepostojanje odgovarajućih podataka. Jedino se raspolagalo sa merenjima pižozometarskih nivoa izdani u zaleđu, na pižozometru S-99, slika 8, u periodu 2003. – 2018. godina.

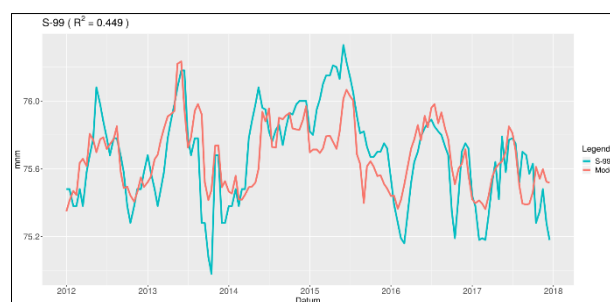
Odlučeno je da se na osnovu ovih merenja izvrši statističko modeliranje pižozometarskih nivoa metodom linearne regresije, kako bi se izvršila rekonstrukcija nivoa u zaleđu područja, za period od interesa (maj 1979. – maj 1980). U analizi promena nivoa podzemnih voda izmerenih u pižozometrima razmatrane su tri

veliĉine: dnevni nivo reke Dunav, srednja dnevna koliĉina padavina i srednja dnevna temperatura vazduha. Nakon prvih analiza uoĉeno je da temperatura vazduha nema znaĉajan uticaj na promenu režima podzemnih voda, tako da je analiza izvršena sa nivoima Dunava i dnevnim padavinama. Za modeliranje je korišćen kompleksan model koji sadrži sumu, sumu kvadrata binoma i sumu kuba binoma modifikovanih uzroĉnih veliĉina. Sprovedenim proraĉunima je dobijeno dobro poklapanje proraĉunom dobijenih i merenih vrednosti pižozometarskih nivoa, slika 9, te se model mogao usvojiti kao reprezentativan za rekonstrukciju pižozometarskih nivoa na datoj lokaciji za period kalibracije 01.05.1979. – 30.04.1980.



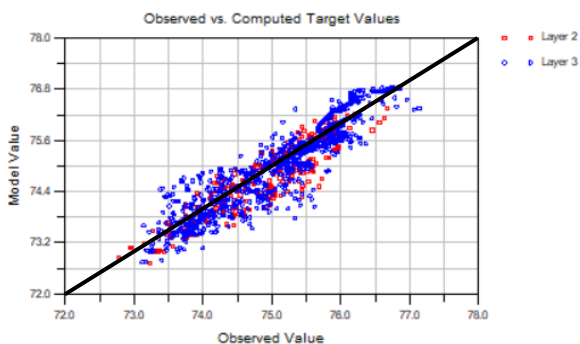
Slika 8. Rezultati proraĉuna nivoa podzemnih voda na pižozometru S-99

Prikazanim modelom je izvršena rekonstrukcija pižozometarskih nivoa u zaleđu i postupak kalibracije je mogao da bude izvršen.



Slika 9. Rezultati proraĉuna nivoa podzemnih voda na pižozometru S-99

Kada je procenjeno da je dobijeno zadovoljavajuće poklapanje proraĉunom dobijenih i merenih vrednosti pižozometarskih nivoa na pižozometrima, procenjeno je da je model kalibrisan, slika 10. Prikaz statističkih parametara kalibrisanog modela dat je na slici 11.



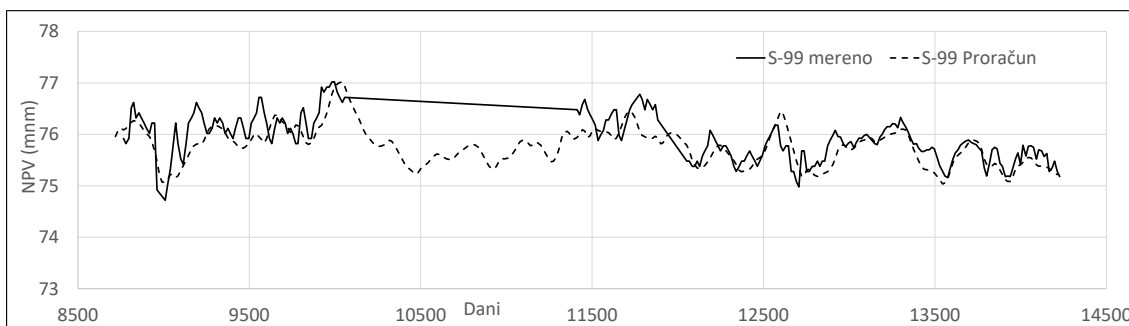
Slika 10. Sumarni prikaz upoređenja merenih i proračunskih dobijenih vrednosti pijezometarskog nivoa

Residual Mean	= 0.06	Close
Residual Standard Dev.	= 0.35	
Absolute Residual Mean	= 0.27	
Residual Sum of Squares	= -1.90e+02	
RMS Error	= 0.36	
Minimum Residual	= -1.07	
Maximum Residual	= -1.57	
Range of Observations	= 4.36	
Scaled Res. Std. Dev.	= 0.081	
Scaled Abs. Mean	= 0.062	
Scaled RMS	= 0.083	
Number of Observations	= 1468	

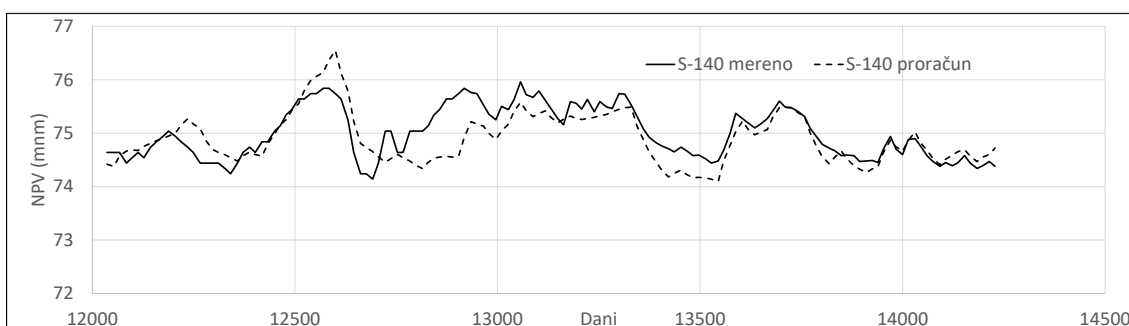
Slika 11. Statistički parametri kalibrisanog modela

U postupku kalibracije modela (ručna i automatska) došlo se do reprezentativnih vrednosti parametara vodonosne sredine (koeficijent filtracije i specifična izdašnost izdani) kao i do reprezentativnih vrednosti graničnih uslova (hidraulički otpor rečnog dna (Dunava, i rukavca Šodroš) i doticaj podzemnih voda iz zaleđa).

U cilju provere reprezentativnosti modela izvršena je verifikacija kalibrisanog modela, proračunima za drugi vremenski presek. Model je kalibrisan za vremenski period 01.05.1979. – 30.04.1980., dok su verifikacioni proračuni izvršeni za vremenski period 01.01.1979. - 31.12.2019. godine. U cilju optimizacije vremena, potrebnog za izvršenje samog proračuna, kao i softversko - hardverskih zahteva i same veličine modela, odabrano je da se kao vremenski period („*stress period*“) uzme period od mesec dana. Prikaz rezultata verifikacionih proračuna, u vidu upoređenja proračunom dobijenih i merenih vrednosti pijezometarskih nivoa na pijezometrima S-99 i S-140, dat je na slici 12 i slici 13.



Slika 12. Uporedni prikaz proračunskih dobijenih i merenih vrednosti pijezometarskih nivoa na pijezometru S-99



Slika 13. Uporedni prikaz proračunskih dobijenih i merenih vrednosti pijezometarskih nivoa na pijezometru S-140

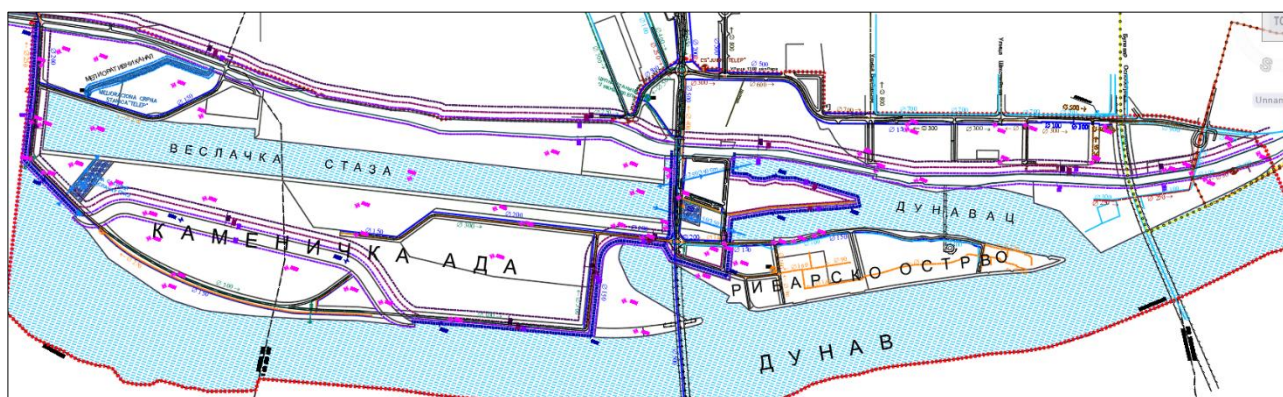
7. SIMULACIJA REŽIMA PODZEMNIH VODA U PROJEKTOVANIM USLOVIMA

Promena namene područja Kameničke ade u budućnosti podrazumeva pomeranje nasipa oko 500 m prema Dunavu, na postojeću obalsku liniju i pretvaranje nebranjeno područja u branjeno, nasipanje terena (delimično, ili potpuno) i formiranje veslačke staze od postojećeg Šodroš dunavca, slika 14. Prema planskim dokumentima, [5], definisano je da veslačka staza bude u direktnom hidrauličkom kontaktu sa vodonosnom

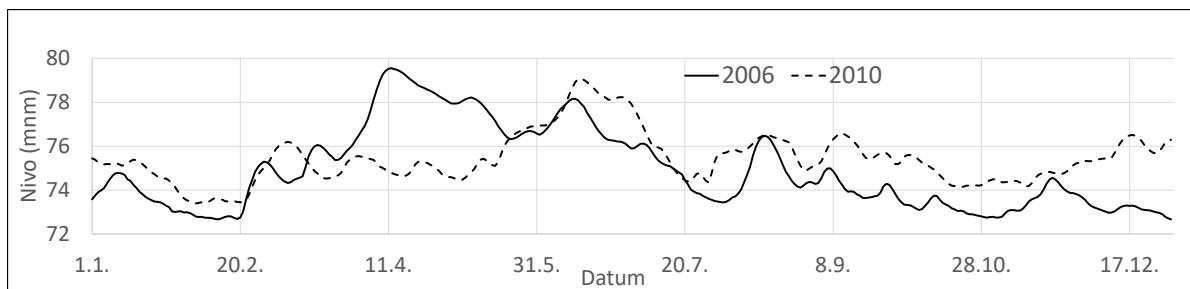
sredinom i da se nivo u veslačkoj stazi održava na konstantnoj koti od 74,50 mm.

Prognozni proračuni su sprovedeni za različite hidrološke uslove kojima su simulirani različiti nivoi Dunava.

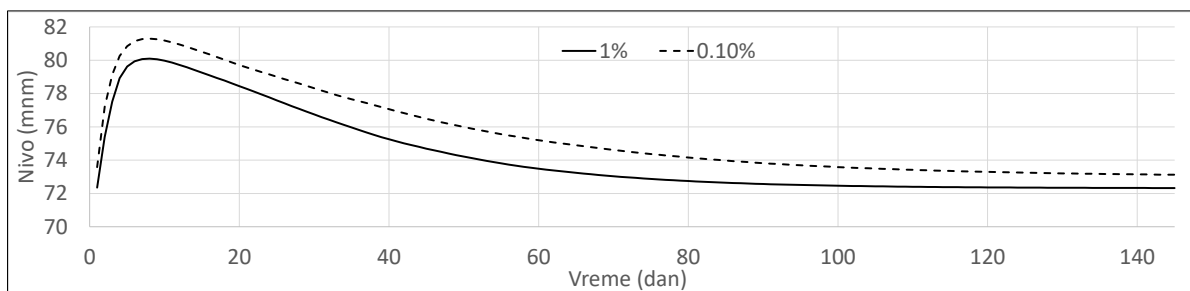
Za ove potrebe kao merodavni hidrološki uslovi uzete su 2006. i 2010. godina, slika 15, kao i sintetički nivogrami dobijeni na osnovu proračuna na 2D hidrauličkom modelu Dunava, sprovedenim za ove potrebe, tako da je korišćen sintetički nivogram pojave 1% nivoa i 0,1% nivoa Dunava, slika 16.



Slika 14. Prikaz planiranog uređenja Kameničke ade

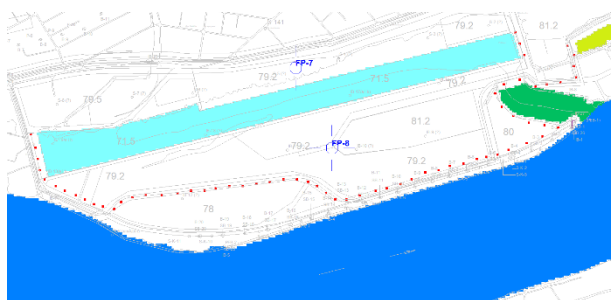


Slika 15. Dnevni nivoi Dunava za 2006. i 2010. godinu



Slika 16. Sintetički nivoi Dunava sa 1% i 0,1% verovatnoćom pojavljivanja

Za uređenje terena analizirano je kompletno nasipanje, delimično nasipanje i izgradnja prve drenažne linije, slika 17. Prema planskim dokumentima, [5], definisano je da veslačka staza bude u direktnom hidrauličkom kontaktu sa vodonosnom sredinom i da se nivo u veslačkoj stazi održava na konstantnoj koti od 74,50 mm. Takođe je definisano da I drenažna linija održava kotu nivoa podzemnih voda na koti 74,50 mm.



Slika 17. Dispozicija i drenažne linije

Kombinujući navedene hidrološke uslove sa varijantnim rešenjima uređenja prostora, došlo se do scenarija (proračunskih šema) za potrebe sprovođenja hidrodinamičkih analiza na matematičkom modelu Kameničke ade.

Ukupno je formirano 5 varijanti uređenja koje su kombinovane sa različitim hidrološkim uslovima, tako da je dobijeno 11 prognoznih varijanti proračuna.

Proračuni su rađeni u nestacionarnim uslovima strujanja podzemnih voda sa vremenskim korakom od 1 dana.

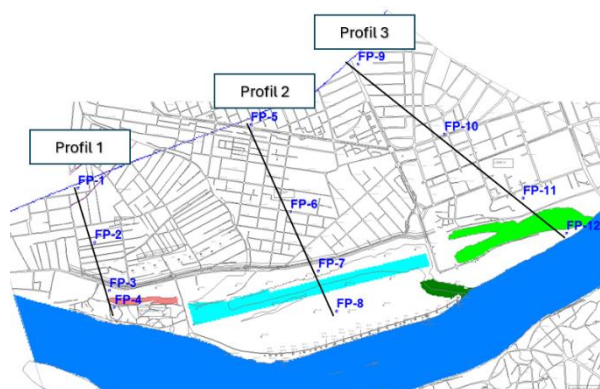
Tabela 1. Varijante prognoznih proračuna

Varijanta	Veslačka staza	Kompletno nasipanje	Delimično nasipanje	Drenažna linija	Nivoi Dunava
1	+	+	-	-	2006, 2010, Q(1%), Q(0.1%)
2	+	+	-	+	2006
3	+	-	+	-	2006, 2010, Q(1%), Q(0.1%)
4	+	-	+	+	2006
5	-	-	+	+	2006

Osnovna ideja je bila da se poređenjem rezultata za postojeće uslove uređenja terena sa rezultatima za uslove hidrotehnički uređenog terena sagledaju i kvantifikuju potencijalni uticaji.

Način prikaza i analize rezultata hidrodinamičkih proračuna biće prikaza za varijantu 1, hidrološki uslovi 2006. godina.

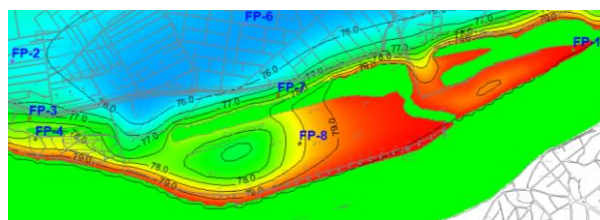
Za ove potrebe je u domen modela postavljeno 12 kontrolnih tačaka – fiktivnih pijezometara, u 3 profila na kojima je vršeno poređenje rezultata proračuna za postojeće i projektovane uslove uređenja prostora, slika 18.



Slika 18. Položaj pijezometarskih profila i kontrolnih tačaka

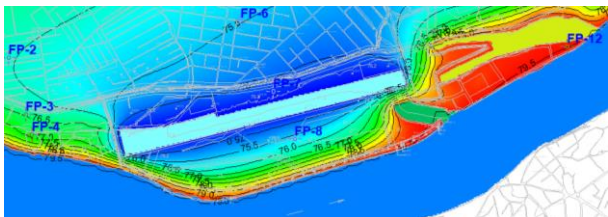
Prikaz rezultata je dat preko izolinja pijezometarskih nivoa u planu, preko pijezometarskih nivoa u profilu na kontrolnim tačkama, bilansa voda i zadovoljenosti kriterijuma zaleganja nivoa podzemnih voda.

Rezultati proračuna za uslove postojećeg stanja dispozicije terena i nivoa Dunava iz 2006. godine prikazani su na slici 19.



Slika 19. Rezultati proračuna za 2006. godinu - postojeće stanje

Za izmenjene uslove na terenu, koji su u ovom slučaju podrazumevali kompletno nasipanje terena i formiranje veslačke staze, prikaz rezultata hidrodinamičkih proračuna dat je na slici 20.

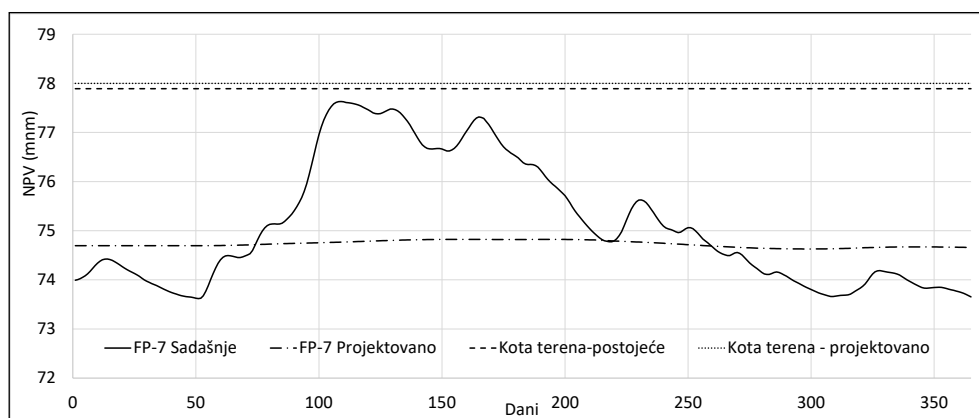


Slika 20. Rezultati proračuna za 2006. godinu – pijeziometrički nivoi u planu -projektovano stanje varijanta 1

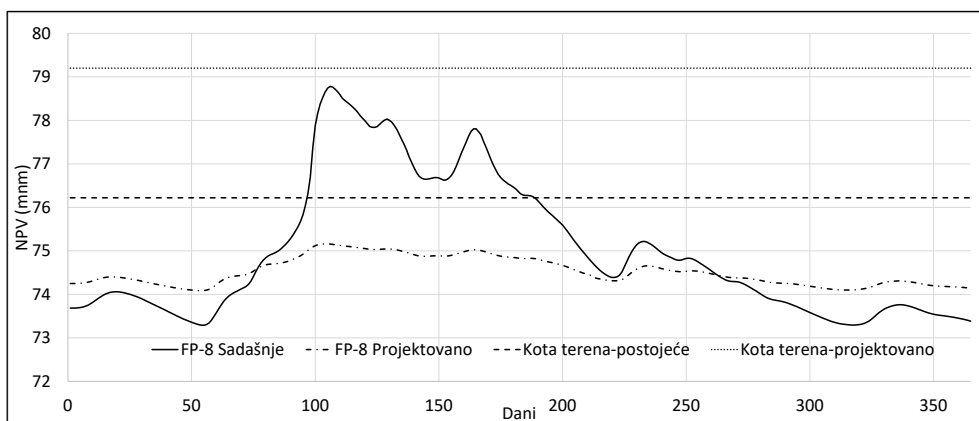
Obzirom da je područje između postojećeg nasipa i veslačke staze i veslačke staze i Dunava bilo od najvećeg interesa, za ove zone dat je prikaz poređenja pijeziometričkih nivoa na lokacijama kontrolnih tačkaka FP-7 i FP-8, slika 21, slika 22.

Pored analize pijeziometričkih nivoa u planu i profilu, sagledavan su bilansne veličine, kroz bilans Dunava i bilans veslačke staze, koji u projektovanim uslovima imaju najznačajniju ulogu u formiranju režima podzemnih voda na datom području. Prikaz bilansnih veličina Dunava i veslačke staze dat je na slikama 23 i 24.

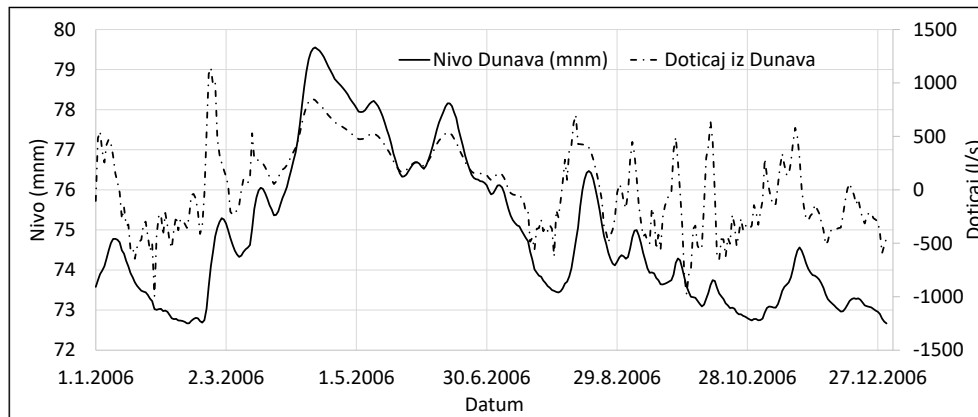
Za date uslove vršena je i analiza zadovoljenosti kriterijuma dubine zaleganja nivoa podzemnih voda po području. Obzirom da je predmetna oblast predviđena za urbanizaciju i da se naslanja na postojeće urbanizovano područje, usvojen je kriterijum da je minimalna dubina zaleganje nivoa podzemnih voda 2 m.



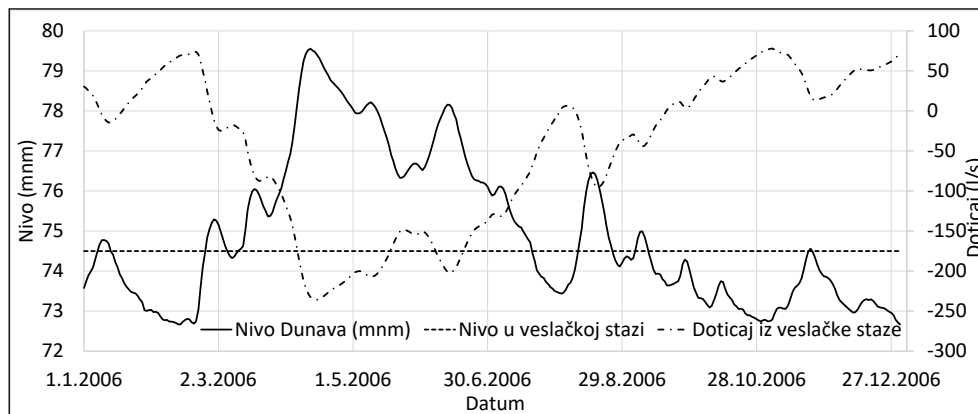
Slika 21. Rezultati proračuna za 2006. godinu – pijeziometrički nivoi FP-7- varijanta 1



Slika 22. Rezultati proračuna za 2006. godinu – pijeziometrički nivoi FP-8 varijanta 1



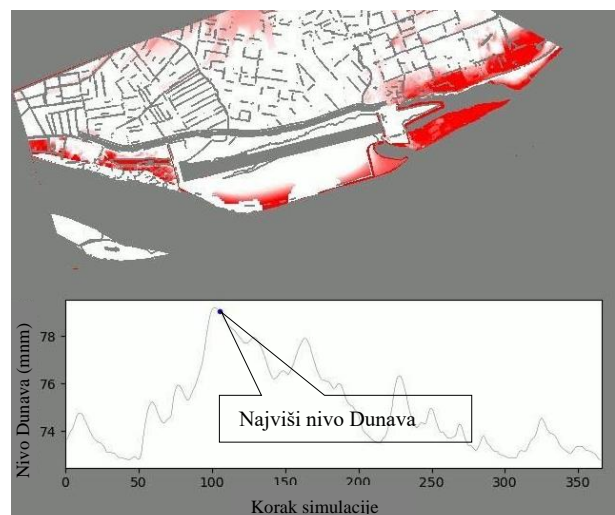
Slika 23. Uporedni prikaz nivoa i bilansa Dunava za projektovane uslove: 2006. godina – varijanta 1



Slika 24. Uporedni prikaz nivoa Dunava, nivoa u veslačkoj stazi i bilansa veslačke staze za projektovane uslove: 2006. godina – varijanta 1

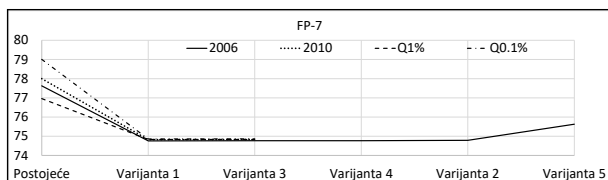
Za ovako definisan kriterijum u svakoj modelskoj ćeliji u svakom vremenskom koraku se vrši analiza dubine zaleganja nivoa podzemnih voda u odnosu na kotu terena. U koliko je dubina zaleganja nivoa podzemnih voda ovda veća od 2 m, ćelija se proglašava da nije ugrožena i ostaje u beloj boji. U koliko je dubina zaleganja nivoa podzemnih voda manje od 2 m u odnosu na površinu terena, proglašava se da je ćelija ugrožena i boji se nijansu crvene boje od bledo crvene do jarko crvene. Što je dubina zaleganja nivoa manja to je boja intenzivnija. Prikaz analize kriterijuma zaleganja nivoa podzemnih voda data je na slici 25.

Analogno prikazanom, identičan postupak hidrodinamičke analize režima podzemnih voda na širem području Kameničke ade je izvršen i za ostale varijante i pod varijante uređenja prostora.

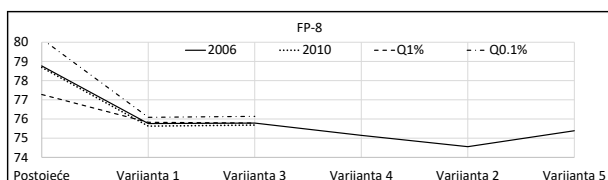


Slika 25. Zadovoljenost kriterijuma dubine zaleganja nivoa podzemnih voda za projektovane uslove: 2006. godina – varijanta 1

U cilju poređenja analiziranih varijanti, za potrebe odabira optimalnog tehničkog rešenja uređenja prostora, dat je prikaz poređenja rezultata za sve varijante proračuna, odnosno za sva scenarija uređenje i za sve hidrološke uslove. Prikazani su maksimalni pijezometarski nivoi na odabranim tačkama (FP-7 i FP-8), slika 26 i slika 27.



Slika 26. Maksimalni pijezometarski nivoi po varijantama proračuna na lokaciji pijezometra FP-7



Slika 27. Maksimalni pijezometarski nivoi po varijantama proračuna na lokaciji pijezometra FP-8

Paralelno sa analizom distribucije pijezometarskih nivoa po prostoru, vršena je i analiza bilansa voda na području, sa posebnim osvrtom na bilans veslačke staze i drenažne linije, kao objekata krucijalnih za uređenje režima nivoa podzemnih voda na datom prostoru, tabela 2.

Tabela 2. Sumarni prikaz bilansa voda po varijantama

Stanje	Doticaj / Isticanje / Doticaj u veslačku stazu / Doticaj u drenažu					
	Doticaj iz Dunava (l/s)	Isticanje u Dunav (l/s)	Doticaj iz veslačke staze (l/s)	Doticaj u veslačku stazu (l/s)	Doticaj u drenažu (l/s)	
1	2006	1130	1000	50	300	*
	2010	820	930	10	290	*
	Q1%	1990	420	79	290	*
	Q0,1%	3000	370	22	380	*
2	2006	1480	1010	74	96	1080
3	2006	1130	1000	60	320	*
	2010	800	920	15	306	*
	Q1%	1780	460	80	326	*
	Q0,1%	3000	345	30	408	*
4	2006	1142	995	78	163	735
5	2006	1170	980	-	-	815

4. ZAKLJUČAK

Hidrotehničko uređenje određenog prostora uključuje radove koji mogu direktno ili indirektno da utiču na izmenu režima podzemnih voda, što u značajnom broju

slučajeva inicira negativne efekte po okolinu i objekte na određenom području.

U ovakvim uslovima je neophodno u predprocesingu izgradnje (kroz projektnu dokumentaciju) definisati i na inženjerski prihvatljiv način kvantifikovati promene koje bi imale uticaja na izmenu režima podzemnih voda.

U cilju sagledavanja efekata projektovanih rešenja, primenjuje se hidrodinamičko modeliranje strujanja podzemnih voda kao izuzetno korisna i efikasna alatka.

Analiza efekata uređenja prostora na izmenu režima podzemnih voda korišćenjem hidrodinamičkog modeliranja podrazumeva sprovođenje niza proračuna za različite uslove, postojeće i projektovane. Dalja obrada dobijenih rezultata omogućava donošenje odgovarajućih zaključaka pri odabiru optimalnog tehničkog rešenja.

Hidrodinamički model, kao alatka, može se koristiti u početnim – studijskim fazama, kao i u višim fazama projektovanja, kao prvi uvid u izmenu režima podzemnih voda određenog prostora.

Ažuriranjem i nadgradnjom modela u periodu eksploatacije objekata mogu se predvideti određene pojave na sistemu. Simulacija uticaja radova u periodu realizacije na režim podzemnih voda podrazumeva i razvoj savremenog softverskog okruženja koje podržava ovakav način rada, odnosno razvoj platformi za simultanu realizaciju većeg broja proračuna, kao i platformi za prikaz rezultata i generisanje izveštaja o izvršenim proračunima.

Prostor Kameničke ade i Ribarskog ostrva u Novom Sadu predstavlja pozitivan primer primene metodologije hidrodinamičkog modeliranja strujanja podzemnih voda u građevinarstvu.

U ovom slučaju za potrebe sagledavanja režima podzemnih voda u uslovima hidrotehničkog uređenja prostora izvršeno je formiranje hidrodinamičkog modela strujanja podzemnih voda. Za potrebe kalibracije modela, razvijeno je softversko rešenje – platforma za izvršenje proračuna, kojom je proces kalibracije modela u značajnoj meri automatizovan i samim tim ubrzan.

Na kalibrisanom modelu izvršen je niz hidrodinamičkih proračuna za predefinisane proračunske šeme – varijante koje su podrazumevale različite scenarije uređenja prostora i različite hidrološke uslove.

Na osnovu rezultata sprovedenih proračuna, poređenjem režima podzemnih voda u postojećem i projektovanim stanjima sagledan je i kvantifikovan uticaj ovih izmena.

Na osnovu rezultata izvršenih proračuna u svim prikazanim varijantama dobijeno je da planirani radovi na hidrotehničkom uređenju Kameničke ade neće dovesti do pogoršanja režima podzemnih voda na datom području (odnosno pogoršanja u odnosu na zahtevane posledice). Izgradnjom veslačke staze, koja će u skladu sa planskim dokumentima biti „usečena“ u vodonosni sloj, formiraće se stabilniji režim nivoa podzemnih voda, obzirom da će staza u svom širem okruženju doprinositi održavanju konstantnog nivoa podzemnih voda. Ovo u konkretnom slučaju znači da će se u periodu visokih nivoa Dunava ponašati kao „dren“, to jest da će prikupljati višak vode na području (koji bi se bez nje inače javio), čime će sprečavati plavljenje terena usled visokih nivoa podzemnih voda. Sa druge strane u periodu niskih nivoa Dunava, kada su i nivoi podzemnih voda niži, staza će nalivati podzemnu sredinu čime će se nadoknađivati deficit vode u tlu. Naravno, sve pomenuto se podrazumeva u uslovima redovnog održavanja veslačke staze, odnosno očuvanja njene hidrauličke uloge u režimu podzemnih voda.

Planirani novi nasip pored Dunava, suštinski menja status Kameničke ade – od inudacije, postaje branjeno područje. Proračuni simulacije režima podzemnih voda u postojećim uslovima su pokazali da pojava vode na površini terena nije samo posledica površinskog plavljenja terena, nego i prodiranja podzemnih voda na njegovu površinu (što se, objektivno u periodu rada na ovom zadatku, nije moglo na terenu detektovati). U novim, projektovanim uslovima, sa novim nasipom, a bez intervencije na prirodni reljef terena, problem prodora podzemnih voda na površinu terena se može javiti u istočnom delu Kameničke ade, gde su niže kote terena, oko 74 do 75 mnm.

Sa nasipanjem terena, pomenuti problem se uveliko prevazilazi. Proračuni su pokazali da se nasipanjem terena na kotu 79 mnm i više, potpuno eliminiše potreba dodatnih mera odbrana od visokih podzemnih voda. Delimično, lokalno nasipanje terena, međutim, zahteva preduzimanje mera odbrane, izgradnjom drenažne linije u području. Između ove dve prikazane varijante, treba tražiti optimalno tehničko i ekonomsko rešenje. Sa gledišta održavanja režima podzemnih voda u široj zoni Kameničke ade (sa ili

bez drenažne linije), veslačka staza ima najveći značaj. Posebnu važnost ima činjenica da je ovaj objekat veštačkog porekla i sa zadatim režimom eksploatacije, što podrazumeva i permanentni režim održavanja. Svi proračuni i analize režima podzemnih voda u ovoj studiji su realizovani sa održanim vodostajem veslačke staze na koti 74.5 mnm i zahtevom da je dno u fizičkom i hidrauličkom kontaktu s vodonosnom sredinom. Sprovedenim proračunima je takođe sagledan i bilans veslačke staze, obzirom na njenu dvojnou ulogu u zavisnosti od hidroloških uslova na području. Na osnovi izvedenih proračuna, dobijeno je da u periodima visokih vodostaja veslačka staza drenira, u zavisnosti od hidroloških uslova, između 100 l/s (postojanje prve drenažne linije u priobalju) i 400 l/s (hiljadugodišnji Dunav). Dok u periodu niskih vodostaja iz staze se u vodonosnu sredinu infiltrira između 10 i 80 l/s.

Dalja analiza dobijenih rezultata izvršenih proračuna daće smernice za odabir optimalnog tehničkog rešenja uređenja prostora i definisati parametre za više faze projektovanja.

Uzimajući u obzir sve navedene rezultate dobijene u sklopu izvedenih hidrodinamičkih proračuna na matematičkom modelu, može se konstatovati da planirane izmene na prostoru Kameničke ade (hidrotehničko uređenje - formiranje veslačke staze, marine i nasipanje terena) neće imati negativne implikacije na zahtevani režim podzemnih voda. Formiranje veslačke staze na prostoru Kameničke ade će dovesti do formiranja stabilnijeg režima nivoa podzemnih voda. Hidraulička uloga veslačke staze će održavati konstantan nivo podzemnih voda, braneći šire područje (uključujući deo naselja Telep i Adice) u periodu visokih nivoa.

LITERATURA

- [1] Elaborat o zonama sanitarne zaštite izvorišta i kompleksa prerade vode „Štrand“ u Novom Sadu – Inovacija, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Čerini“, 2010. godina,
- [2] Podzemne vode Vojvodine, monografija, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Čerini“, 2012. godina,
- [3] Hidrološka studija Dunava sa hidrografskim podacima za potrebe izrade PGR-a na levoj obali Dunava u Novom Sadu, Vojvodinaprojekt, 2019.
- [4] Mišljenje na Hidrološku studiju vodotoka Dunava sa hidrografskim podacima za potrebe izrade Plana

- generalne regulacije na levoj obali Dunava u Novom Sadu, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, 2019.
- [5] Nacrt Plana generalne regulacije priobalja na levoj obali Dunava u Novom Sadu, JP „Urbanizam“ - Zavod za urbanizam Novi Sad, 2019.
- [6] Studija hidrotehničkog uređenja površinskih i podzemnih voda priobalja na levoj obali Dunava u Novom Sadu u zoni Kameničke ade i Ribarskog ostrva, Knjiga 3 – Analiza režima podzemnih voda, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ 2021.

METHODOLOGY FOR PREDICTION OF THE GROUNDWATER REGIME UNDER THE CONDITIONS OF SPATIAL DEVELOPMENT ON THE LEFT BANK OF THE DANUBE IN NOVI SAD

by

Vladimir LUKIĆ, Goran JEVTIĆ, Milenko PUŠIĆ, Vesna TRIPKOVIĆ
Jaroslav Černi Water Institute, Belgrade

Summary

The left bank of the Danube in the area of Novi Sad, specifically in the Kamenička Ada and Ribarsko ostrvo zones, is currently an unprotected, hydrotechnically undeveloped, and non-urbanized area. Contemporary city development trends emphasize utilizing riverbanks for multifunctional purposes. For the left bank of the Danube in the Kamenička Ada and Ribarsko Ostrvo zones, it is proposed to shift the existing defense (flood protection) line of the embankment approximately 500 meters closer to the riverbed. The arrangement of the protected area formed in this manner, in accordance with the defined project documentation, involves the creation of a rowing path to replace the existing Šodroš backwater of the Danube. The concept for the rowing path envisions establishing direct hydraulic contact with the aquifer while ensuring a consistently maintained water level. This approach ensures its hydraulic role as a regulator of the groundwater regime in the area. As part of developing the General Urban Plan for this area, it was necessary to assess the impact of the proposed changes on the groundwater regime. To assess the impact of the planned works on groundwater regime changes, a hydrodynamic groundwater flow model was

created for the given area. The model aims to define and quantify the changes that would occur in an acceptable engineering manner. Accordingly, the hydrodynamic model was developed, calibrated and verified, and predictive calculations were performed based on defined computational scenarios. By comparing the calculation results for the current state with those for the planned state, the impact of the proposed changes on the groundwater regime was assessed and quantified. The analysis of the obtained results revealed that shifting the embankment closer to the Danube does not significantly affect the groundwater regime. Constructing the rowing track under the given premises would have a positive impact on the groundwater regime in the area. During periods of high Danube water levels, the rowing path would act as a drain, collecting excess groundwater. Conversely, during low water levels in the Danube and aquifer, it would replenish the aquifer, compensating for water deficits.

Key words: groundwater, regime, prognosis, hydrodynamic model.