

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Dragoljub I. Bajić

**FAZI OPTIMIZACIJA U
HIDRODINAMIČKOJ ANALIZI ZA
POTREBE PROJEKTOVANJA SISTEMA
ODBRANE OD PODZEMNIH VODA**

doktorska disertacija

Beograd, 2015

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Dragoljub I. Bajić

**FUZZY OPTIMIZATION IN THE
HYDRODYNAMIC ANALYSIS FOR THE
PURPOSES OF GROUNDWATER
CONTROL SYSTEM DESIGN**

Doctoral Disseration

Belgrade, 2015

Mentori:

Dr Dušan Polomčić, redovni profesor, uža naučna oblast: vodosnabdevanje i
menadžment podzemnih voda
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Dr Igor Jemcov, vanredni profesor, uža naučna oblast: vodosnabdevanje i
menadžment podzemnih voda
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Članovi komisije:

Dr Veselin Dragišić, redovni profesor, uža naučna oblast: vodosnabdevanje i
menadžment podzemnih voda
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Dr Vesna Ristić Vakanjac, vanredni profesor, uža naučna oblast:
vodosnabdevanje i menadžment podzemnih voda
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Dr Tina Dašić, vanredni profesor, uža naučna oblast: vodoprivredni i
hidroenergetski sistemi
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

Datum odbrane: _____

ZAHVALNICA

Ovom prilikom iskazao bih zahvalnost svojim mentorima dr Dušanu Polomčiću i dr Igoru Jemcovu, koji su svojim savetima i zalaganjem doprineli kvalitetu i izradi ovoga rada. Takođe, zahvalnost bih iskazao i članovima komisije: dr Veselinu Dragašiću, dr Vesni Ristić Vakanjac i dr Tini Dašić.

Zahvaljujem se i Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja za sufinansiranje naučnih skupova u inostranstvu i eksperimentalnog dela doktorske disertacije. Posebno želim da se zahvalim dr Zoranu Stevanoviću, rukovodiocu projekta „Potencijal i podloge za održivo korišćenje podzemnih voda“.

APSTRAKT

Sistemi za odbranu od podzemnih voda se koriste za zaštitu hidrotehničkih objekata, priobalja, meliorativnih područja, naselja, rudnika, predstavljajući značajne segmente bez kojih bi funkcionalnost ovih objekata bila dovedena u pitanje. Posebno složeni sistemi odbrane od podzemnih voda se karakterišu kod ležišta mineralnih sirovina, imajući u vidu njihovu dinamičnost, koja se ogleda u stalnom širenju ležišta, kao i činjenicu da ova ležišta prodiru duboko u stensku masu različitog strukturnog tipa poroznosti, a time i u podzemne vode, različite po hidrodinamičkim osobinama.

Površinski kop „Buvač“, uzev u obzir njegove karakteristike, predstavlja složen sistem praćen intenzivnim promenama koje se dešavaju tokom eksploatacije mineralnih sirovina, a značajnim i u pogledu problematike odbrane od podzemnih voda. Upravo ovakav sistem zahteva stalno prilagođavanje novonastalim uslovima, što uslovljava uspostavljanje i razvoj metodskih postupaka za uspešnu odbranu od podzemnih voda u uslovima kontinuiranih promena. Parcijalni pristup rešavanja ove problematike najčešće ne dovodi do efikasnog, odnosno, do optimalnog rešenja sistema odbrane od podzemnih voda. Integracijom različitih faktora koji podrazumevaju tehničke karakteristike sistema odbrane od podzemnih voda, uticaje na životnu sredinu, ekonomske kriterijume i njihove podkriterijume, moguće je sveobuhvatnije sagledati predmetnu problematiku.

U cilju rešavanja ovog zadatka primenjeni su različiti postupci: metoda hidrodinamičkog modeliranja režima podzemnih voda, kombinacija teorije fazi logike i geostatistike i teorije fazi logike i višekriterijumske optimizacije.

Za projektovanje i izbor karakteristika sistema odbrane od podzemnih voda primenjena je metoda hidrodinamičkog modeliranja režima podzemnih voda. Tako su definisani elementi sistema za odbranu od podzemnih voda, njihove karakteristike (npr. kapaciteti bunara), njihov raspored u planu i profilu, redosled izvođenja drenažnih objekata, a sve to je povezano sa šemom i dinamikom izvođenja pripremni i eksploatacionih radova na površinskom kopu.

Rezultat primene metode hidrodinamičkog modeliranja režima podzemnih voda predstavlja dobijanje više varijantnih rešenja, tj. „scenarija“/„alternativa“ sistema odbrane od podzemnih voda, te je tako omogućeno sagledanje efekata rada različitih sistema odbrane.

Povodom podataka i parametara koji se razmatraju u hidrogeologiji često se javlja pitanje sigurnosti, preciznosti i kompletnosti u smislu obima. Da bi se prevazišli takvi problemi, određeni podaci mogu biti subjektivno izraženi u vidu „znanja“ od strane eksperta, što zahteva heuristički pristup rešavanju problema pomoću fazi logike. Jedan od osnovnih ulaznih parametara za hidrodinamički model - koeficijent filtracije je određivan primenom fazi kriginga, odnosno, kombinacijom fazi logike i geostatističke metode kriginga.

U dosadašnjoj praksi rešavanja problematike dreniranja površinskih kopova prilikom izbora optimalnog rešenja najčešće se rukovalo ekonomskim kriterijumima. U doktorskoj disertaciji je primenjena savremena metoda odlučivanja u cilju izbora optimalnog sistema odbrane od podzemnih voda, te su „težine“ svih rešenja utvrđivane primenom metode fazi optimizacije, tj. fazi analitičko hijerarhijskog procesa, baziranog na trougaonim fazi brojevima. Primenom navedene metode analizirani su različiti kriterijumi i njihovi podkriterijumi, koji utiču na donošenje optimalnog rešenja. Shodno navedenom, omogućena je održiva odluka o izboru sistema odbrane od podzemnih voda dobijena prethodnom hidrodinamičkom analizom.

Ključne reči: upravljanje podzemnim vodama, procena hidrogeoloških parametara, hidrodinamički model, fazi logika, trougaoni fazi brojevi, znanje eksperta, optimizacija

Naučna oblast: geološko inženjerstvo

Uža naučna oblast: vodosnabdevanje i menadžment podzemnih voda

UDK: 622.586:510.644(043.3)

556.18:510.644(043.3)

532.5:510.644(043.3)

ABSTRACT

Groundwater control systems are used to safeguard hydraulic structures, riparian lands, hydraulic reclamation zones, populated areas, mining operations, and the like. They constitute important functional segments, without which the safety of such structures or areas would be compromised. Especially complex protection systems against groundwater are found in mining operations, given the dynamics resulting from constant expansion and the fact that such operations reach deep into rock masses of varying structural porosity and, consequently, come into contact with groundwaters that feature different hydrodynamic properties.

In view of its characteristics, the open-pit mine “Buvač” is an intricate system that undergoes major changes during the course of ore extraction, which are coupled with significant issues relating to groundwater. In such circumstances, a groundwater control system needs to continually adapt to new conditions and methodical procedures have to be developed for effective protection against groundwater in a constantly changing environment. A partial approach seldom leads to an effective or optimal protection solution. A comprehensive study of the problem is needed, which integrates various factors, including technical characteristics of the protection system, environmental impact, and economic criteria and sub-criteria.

Different methods are applied to address the task: hydrodynamic modeling of the groundwater regime, a combination of the fuzzy logic theory and geostatistics, and the fuzzy logic theory and multicriteria optimization.

Hydrodynamic modeling of the groundwater regime was the method used to design and select the characteristics of the protection system against groundwater. This included the definition of the protection system components, their characteristics (e.g. well capacity), distribution in plan view and elevation, and sequence of construction of drainage components, all closely linked with the configuration and timetable of preparatory and extraction activities in the open-pit mine.

The outcome of hydrodynamic modeling of the groundwater regime included several scenarios/alternatives of the protection system against groundwater, in order to gain insight into the effectiveness of different protection system approaches.

With regard to hydrogeological data and parameters, the question of reliability, accuracy and completeness is often raised. To overcome the problem, some data may be expressed subjectively, based on expert judgment. This requires a heuristic approach to problem solving by means of fuzzy logic. One of the main input parameters of the hydrodynamic model - hydraulic conductivity - was determined by fuzzy kriging (i.e. a combination of fuzzy logic and geostatistical kriging).

In the past, optimal open-pit mine drainage solutions have generally been based on economic criteria. In the present doctoral thesis, however, a contemporary decision-making method is applied to select the optimal protection system against groundwater. The “weights” of all potential solutions were determined by fuzzy optimization (i.e. a fuzzy analytical-hierarchical process), based on triangular fuzzy numbers. Various criteria and sub-criteria, which affect the selection of the optimal solution, were analyzed applying this method. As a result of the hydrodynamic analysis, it was possible to reach a sustainable decision regarding the selection of the groundwater control system.

Key words: groundwater management, assessment of hydrogeological parameters, hydrodynamic model, fuzzy logic, triangular fuzzy numbers, expert judgment, optimization

Scientific discipline: Geological Engineering

Particular area of study: water supply and groundwater management

UDC: 622.586:510.644(043.3)

556.18:510.644(043.3)

532.5:510.644(043.3)

SADRŽAJ

I UVODNA RAZMATRANJA	1
II TEORIJSKI DEO	8
1. Sistemi odbrane od podzemnih voda	8
1.1. Analiza uslova za odbranu od podzemnih voda	9
1.2. Hidrogeološka istraživanja za potrebe projektovanja sistema za odbranu od podzemnih voda	15
1.3. Odbrana i metode odbrane od podzemnih voda	18
1.4. Elementi sistema odbrane od podzemnih voda	23
1.5. Faktori i kriterijumi za izbor elemenata sistema za odbranu od podzemnih voda	39
2. Hidrodinamička analiza režima podzemnih voda	46
2.1. Rešavanje hidrogeoloških problema primenom hidrodinamičke analize	49
2.2. Hidrogeološki model	52
2.3. Trodimenzionalni hidrodinamički model režima podzemnih voda	54
2.3.1. Prevođenje hidrogeološkog modela u hidrodinamički model	56
2.3.1.1. Geometrizacija i diskretizacija prostora i vremena	59
2.3.1.2. Granični i početni uslovi	59
2.4. Etaloniranje hidrodinamičkog modela	67
2.5. Analiza osetljivosti hidrodinamičkog modela	71
2.6. Verifikacija hidrodinamičkog modela	72
2.7. Prognozni proračuni hidrodinamičkog modela - eksploatacija hidrodinamičkog modela	73
2.8. Noveliranje hidrodinamičkog modela	74
2.9. Prikaz rezultata hidrodinamičkog modeliranja	75

3. Primena fazi logike u hidrogeologiji i hidrodinamici	77
3.1. Istorijat razvoja i osnovni koncept fazi logike	77
3.2. Terminologija fazi logike	84
3.3. Fazi skupovi u fazi logici.....	87
3.3.1. Funkcija pripadnosti fazi skupa (μ) i njeni oblici	88
3.3.2. Osnovni operatori fazi skupova	95
3.3.3. Fazi relacije	101
3.4. Fazi brojevi	105
3.5. Aritmetički operatori fazi brojeva	113
3.5.1. Operacije sa jednim operatorom	113
3.5.2. Binarne operacije	114
3.6. Primena fazi logike u geostatistici - fazi kriging	116
3.7. Primena fazi logike u optimizaciji	123
3.7.1. Izbor kriterijuma za fazi optimizaciju	126
3.7.2. Metoda analitičko hijerarhijskog procesa (AHP metoda)	
.....	129
3.7.3. Osnovni koncept fazi analitičko hijerarhijskog procesa	
(FAHP)	133
3.7.4. Prikaz koncepta fazi optimizacije i izbor metode	137
III EKSPERIMENTALNI DEO, REZULTATI I DISKUSIJA	153
1. Izbor i karakteristike eksperimentalnog područja istraživanja - površinski kop	
„Buvač“	153
1.1. Klimatske, hidrografske i hidrološke karakteristike istražnog	
područja	154
1.2. Geološke karakteristike istražnog područja	155
1.3. Hidrogeološke karakteristike istražnog područja	160
2. Hidrogeološki model površinskog kopa „Buvač“	167
3. Prvi trodimenzionalni hidrodinamički model režima izdani površinskog kopa	
„Buvač“	171
3.1. Diskretizacija strujnog polja istražnog područja	172

3.2. Geometrija šematizovanih slojeva istražnog područja	174
3.3. Filtracione karakteristike istražnog područja	175
3.4. Granični uslovi na istražnom području	176
3.5. Etaloniranje prvog modela površinskog kopa „Buvač“	179
4. Inovirani trodimenzionalni hidrodinamički model površinskog kopa „Buvač“	183
4.1. Postavljanje inoviranog hidrodinamičkog modela istražnog područja	184
4.2. Procena filtracionih karakteristika porozne sredine istražnog područja primenom fazi kriging metode	186
4.3. Granični uslovi na istražnom području	190
4.4. Kalibracija inoviranog hidrodinamičkog modela površinskog kopa „Buvač“	195
4.5. Bilans podzemnih voda na istražnom području	199
5. Hidrodinamički prognozni proračuni za potrebe projektovanja sistema odbrane površinskog kopa „Buvač“ od podzemnih voda	200
5.1. Menadžment scenariji - varijante rešenja karakteristika sistema odbrane od podzemnih voda	202
5.1.1. Varijanta 1 sistema odbrane od podzemnih voda	206
5.1.2. Varijanta 2 sistema odbrane od podzemnih voda	207
5.1.3. Varijanta 3 sistema odbrane od podzemnih voda	208
5.2. Prikaz rezultata varijantnih hidrodinamičkih proračuna	211
6. Fazi optimizacija - izbor optimalnog sistema odbrane površinskog kopa „Buvač“ od podzemnih voda	235
6.1. Faktori koji utiču na izbor sistema odbrane od podzemnih voda	235
6.2. Postupak ocenjivanja kriterijuma, podkriterijuma i alternativa	240
6.3. Postupak određivanja vektora težinskih prioriteta	244
6.4. Postupak primene principa agregacije	251
6.5. Formiranje fazi matrice odluke i fazi matrice performansi	252
6.6. Određivanje konačnih vrednosti ocena alternativa	253
6.7. Prikaz defazifikacije i rangiranja alternativa	253

6.8. Postupak proračuna ukupnog integrala korišćenjem optimizacionog Indeksa	254
6.9. Prikaz određivanja optimalnog sistema odbrane od podzemnih voda površinskog kopa „Buvač” korišćenjem „Fuzzy-GWC” aplikacije	254
IV ZAKLJUČAK	261
LITERATURA	264

I. UVODNA RAZMATRANJA

Predmet istraživanja doktorske disertacije „Fazi optimizacija u hidrodinamičkoj analizi za potrebe projektovanja sistema odbrane od podzemnih voda“ tretira aktuelnu i kompleksnu problematiku odbrane od podzemnih voda, odnosno, objekte projektovane u složenoj geološkoj/hidrogeološkoj sredini. Navedena problematika je posebno izražena u uslovima dinamičkih sistema podložnih kontinuiranim promenama koji zahtevaju efikasan i fleksibilan sistem odbrane od podzemnih voda, posebno u kompleksnim hidrogeološkim sredinama. Prilikom rešavanja ove problematike suočava se sa nizom različitih faktora, kao što su tehnički, ekološki i ekonomski faktori, a njihovo usaglašavanje i izbor najpovoljnijeg, odnosno optimalnog rešenja predstavlja važan segment, uticajan na efikasnost celokupnog sistema.

Da bi se vršilo obaranje nivoa podzemnih voda i kako bi se stekli povoljni uslovi za rad i život ljudstva, potrebni su sistemi za odbranu od podzemnih voda, sačinjeni od objekata kojima se vrši dreniranje. Sistemi za odbranu od podzemnih voda koriste se za odbranu hidrotehničkih objekata, priobalja, meliorativnih područja i naselja, a naročito složenu problematiku odbrane od podzemnih voda imaju ležišta mineralnih sirovina, te površinski kop limonita „Buvač“ u Republici Srpskoj predstavlja kvalitetan poligon kako po stepenu kompleksnosti hidrogeoloških uslova, tako i po primeni adekvatnog sistema odbrane od podzemnih voda. Shodno navedenom, na ovom primeru razmatrane su polazne hipoteze, kao i primenjeni metodski postupci u cilju izbora efikasnog sistema odbrane od podzemnih voda.

Osnovni cilj doktorske disertacije predstavlja uspostavljanje i razvoj metodskih postupaka koje je moguće primeniti prilikom izbora i projektovanja sistema odbrane od podzemnih voda, i to u složenim hidrogeološkim uslovima, kao i prilikom dinamičkog razvoja objekata podložnim kontinuiranim promenama. Jedan od zadataka ovog istraživanja predstavlja izbor metodskog postupka prilikom rešavanja problema neodređeneosti kod utvrđivanja hidrogeoloških parametara, kao što je koeficijent filtracije. Navedeni zadatak predstavlja osnovni preduslov kod uspostavljanja adekvatnog hidrogeološkog modela za primenu hidrodinamičke analize rešenja odbrane

od podzemnih voda, dok naredni zadatak predstavlja analiza varijantnih rešenja na uspostavljenom hidrodinamičkom modelu i izbor optimalne varijante rešenja u uslovima višekriterijumskog odlučivanja za dinamičke sisteme odbrane od podzemnih voda.

Uspostavljen je algoritam na razmatranom kompleksnom modelu u hidrogeološkom smislu, koji se služi već razvijenom metodologijom. Ovo uspostavljanje podrazumeva način primene i rešavanja problema povodom adekvatnog izbora varijante rešenja odbrane od podzemnih voda u domenu jednostavnih ili pak složenih problema.

Polazne hipoteze. Pretpostavke od kojih se polazi u rešavanju predmetne problematike ove doktorske disertacije proizilaze od poznatih činjenica koje se odnose na uspešnost primene hidrodinamičkog modeliranja prilikom projektovanja sistema odbrane od podzemnih voda, kao i od uspešnosti primene geostatističke metode kriginga i fazi logike prilikom tretiranja problema neodređenosti, potom, i fazi optimizacije prilikom izbora optimalne varijante rešenja.

Polazna hipoteza izvedenih istraživanja predstavlja mogućnost primene fazi logike i kriginga u uspešnijem određivanju hidrogeoloških parametara u hidrodinamičkom modelu, i to u kompleksnim hidrogeološkim uslovima, kao i u slučajevima analize sistema odbrane od podzemnih voda. Pored navedenog, na uspostavljenim varijantnim rešenjima sistema odbrane od podzemnih voda, polazna hipoteza ogleda se i u mogućnosti implementacije višekriterijumskog fazi odlučivanja, kako bi se kvalitetnije utvrdilo optimalno rešenje sistema odbrane od podzemnih voda. Primenljivost iznesenih hipoteza je utvrđivana u složenim hidrogeološkim i hidrodinamičkim uslovima istražnog područja limonitskog ležišta „Buvač“ (Republika Srpska).

Naučne metode i područje istraživanja. Dve metode se posebno izdvajaju i koriste u sprovedenim istraživanjima: numeričke metode konačnih razlika u okviru hidrodinamičkog modeliranja režima podzemnih voda, tj. hidrodinamička analiza, i fazi logika, tj. fazi kriging i fazi optimizacija (metoda fazi analitičko hijerarhijskog procesa).

U doktorskoj disertaciji primenjuje se savremena metoda hidrodinamičkih proračuna, bazirana na numeričkom rešavanju sistema parcijalnih diferencijalnih jednačina trodimenzionalnog kretanja podzemnih voda. Hidrodinamičkim modelom moguće je determinisati parametre porozne sredine (strujne oblasti) i elemente režima podzemnih voda, koji se drugim metodama ne mogu ili se veoma teško mogu odrediti.

Karakteristični ulazni podaci za izradu hidrodinamičkog modela predstavljaju vrednosti koeficijenta filtracije koji su određivani primenom fazi logike i geostatističke metode interpolacije - kriginga. Fazi kriging predstavlja modifikaciju konvencionalne kriging tehnike, koja koristi tačne (merene) podatke, kao i neprecizne procene podataka dobijene od strane eksperta, a za rukovanje nepreciznim i neizvesnim procenama koristi se pristup fazi logike.

U savremenom pristupu prilikom izrade hidrodinamičkih modela prisutan je tzv. kvazi trodimenzionalan pristup, po kom se hidrogeološka sredina deli na više slojeva prema prisutnom geološkom sklopu terena obuhvaćenog modelom, a svaki od slojeva se karakteriše određenim brojem matrica. Za svaki sloj se pravi odgovarajuća matrica vrednosti koeficijenata filtracije, shodno primeru distribucije vrednosti koeficijenta filtracije u modelu. Zbog nedostatka dovoljnog broja merenja, jedan od načina poboljšanja kvaliteta interpolacije koeficijenta filtracije otkriva se u izražavanju „znanja“ u obliku subjektivnih procena tog hidrogeološkog parametra na mestima gde su podaci oskudni. Primena ovakvog metodskog postupka i utvrđivanje koeficijenata filtracije u modelu izvršeno je primenom fazi logike i geostatističke metode kriginga. U doktorskoj disertaciji su analizirana oba slučaja unosa koeficijenta filtracije: koeficijent filtracije unet kao homogeno raspoređene zone oko bunara i koeficijent filtracije uvezen kao rezultat dobijen metodom fazi kriginga. Simuliranjem graničnih uslova na modelu, koji prezentuju realnu prirodnu sredinu, vrši se i kreiranje hidrodinamičkog modela režima izdani, a kalibracija hidrodinamičkog modela je obavljena, takođe, za oba slučaja unosa koeficijenta filtracije. Nakon provere modela, sledi proces „eksploatacije“ modela, dok je na osnovu koncepcije dobijenih prognoznih varijantnih proračuna (scenarija ili alternativa) izvedena i optimizacija sistema za odbranu od podzemnih voda, tj. izvršen je izbor optimalne varijante tehničkog rešenja. Uzev u obzir niz

mogućih ili povoljnih scenarija, donesena je odluka o izboru najbolje varijante, koja u stvari predstavlja optimalno rešenje i kompromis između želje (kriterijuma) i mogućnosti (ograničenja). Kako bi se odredila optimalna varijanta, primenjen je princip fazi logike i višekriterijumske optimizacije - metode analitičko hijerarhijskog procesa.

U pogledu postavljanja prioriteta i donošenja najbolje odluke, podrazumevajući kvalitativne i kvantitativne pokazatelje, fazi analitičko hijerarhijski proces (FAHP) se pokazala kao veoma moćna i fleksibilna metoda. Opšte je poznato da je u mnogim slučajevima veliki broj elemenata kod kreiranja modela za donošenje odluka neizvestan, pa donosioci odluka nisu u mogućnosti da odrede tačne numeričke vrednosti za poređenje odluka. Kako bi postali rešivi ovakvi problemi, specifični po nedovoljno izvesnim, neodređenim ili subjektivno procenjenim parametrima, potrebno je koristiti matematičke metode koje mogu na zadovoljavajući način da tretiraju neizvesnost, neodređenost ili subjektivnost. Ovako posmatrano, fazi logika se pokazuje kao naučno zasnovan pristup, koji koristi iskustvo i intuiciju stručnjaka, a predstavlja i upravljačku metodologiju. Metoda FAHP predstavlja jednu od novijih metoda, korišćenih poslednjih godina u procesu višekriterijumskog odlučivanja kod kompleksnih problema, tj. za izbor neke od alternativa koji imaju različitu važnost. Širok spektar primene FAHP metode, kao npr. u odlučivanju, evaluaciji, alokaciji resursa, planiranju i razvoju, industriji, inženjerstvu, politici, obrazovanju, pokazuje da je ona danas jedna od često primenjivanih metoda višekriterijumske optimizacije. Optimizacija na osnovu jednog tehničkog, ekonomskog ili ekološkog kriterijuma, koji su i ovde korišćeni, obuhvata samo jedan deo problema, a kako bi bio obuhvaćen što veći broj komponenti, neophodno je u analizu rešenja uključiti i njihove podkriterijume.

Za pomenute potrebe je razvijen model u okviru doktorske disertacije, a primenljiv je u donošenju odluke pri izboru optimalnog sistema na primeru odbrane površinskog kopa od podzemnih voda, tj. za sniženje nivoa podzemnih voda, kako bi rudarski proces eksploatacije rude limonita mogao nesmetano da se vrši. Ovom metodom vrši se interaktivno kreiranje hijerarhije problema, u koju je uključeno nekoliko elemenata na svakom nivou, a zatim se vrši upoređivanje parova u elementima hijerarhije (ciljeva, kriterijuma, podkriterijuma i alternativa), kako bi se na kraju izvršila sinteza svih

upoređivanih elemenata, a potom i donela konačna odluka o najboljoj alternativi, tj. varijanti odbrane. Na primeru istražnog područja limonitskog ležišta „Buvač“ (Republika Srpska) su primenjene pomete metode. Hidrogeološka kompleksnost područja istraživanja odlikuje se u pristustvu različitih tipova izdani prema strukturnom tipu poroznosti, kao i prema hidrodinamičkim osobinama. Izdvojene su sledeće izdani, i to pošavši redom od površine terena, pa do podine: izdan u aluvijalnim naslagama, izdan u pliocenskim peskovima, izdan u limonitskom rudnom telu i karstna izdan. Hidraulička povezanost izdvojenih tipova izdani potvrđena je korelacionom vezom sa visokom vrednosti koeficijenta korelacije, kao i hidrohemijskim ispitivanjem, što sve upućuje na jedinstveni tip podzemnih voda. Međutim, problem predstavljaju podzemne vode aluvijalne izdani i vode izdani u rudnom telu na prostoru gde se vrši eksploatacija rude limonita. Shodno tome, primenom metode hidrodinamičkog modeliranja izvršena je analiza režima i bilansa podzemnih voda, a „eksplotacijom” modela definisane su varijante sistema odbrane od podzemnih voda iz aluvijalne izdani i izdani u rudnom telu. Od nekoliko predloženih varijanti, a u zavisnosti od tehničkih, ekonomskih i ekoloških kriterijuma i njihovih podkriterijuma, a služeći se metodom fazi optimizacije - analitičko hijerarhijskog procesa, izabran je optimalni sistem za odbranu od podzemnih voda. Na osnovu iznetog, zaključuje se da se polazna hipoteza u istraživanju odnosi na mogućnost donošenja odluke u rešenju problema u uslovima gde treba uvažiti postojanje više rešenja, najčešće suprostavljenih kriterijuma, pri čemu je rešenje predstavljeno izborom jedne od niza alternativa.

Očekivani naučni doprinos. Primenom naučnih metoda u rešavanju problema opisanih u prethodnom delu teksta očekuje se bitan napredak i postizanje sistematičnosti naučnog saznanja u oblasti hidrogeologije, s obzirom na to da je metoda fazi logike relativno nova i da se tek širi njena primena u svim oblastima. Izrada doktorske disertacije predstavlja doprinos u uvođenju fazi pristupa u hidrogeologiji, u prvom slučaju prilikom tretiranja nepreciznosti i neizvesnosti kod procene hidrogeoloških parametara, a u drugom slučaju, kod donošenja odluke o optimalnom rešenju sistema odbrane od podzemnih voda. Zaključuje se da su specifični ostvareni naučni doprinosi u okviru sprovedenih istraživanja sledeći:

- tretiranje vrednosti koeficijenta filtracije kao ulaznog parametra u hidrodinamičkom modelu metodom fazi logike i geostatističke metode kriginga (fazi kriginga), se pokazao kao kvalitativno bolji postupak u odnosu na primenu homogeno raspoređenih zona koeficijenta filtracije; ovakav postupak predstavlja doprinos u primeni fazi logike u hidrogeologiji;
- kompleksnim hidrodinamičkim modelom analizirani su različiti scenariji za odbranu od podzemnih voda, tj. sistemi odbrane od podzemnih voda, kao i njihove karakteristike, broj drenažnih objekata i njihov raspored, potrebno vreme za maksimalne efekte snižavanja nivoa podzemnih voda i efekti rada sistema u funkciji obaranja pijezometarskih nivoa, što predstavlja uspostavljanje algoritma prilikom rešavanja navedenih problema;
- metodom fazi analitičko hijerarhijskog procesa (višekriterijumska optimizacija) izvršeni su proračuni za dobijanje optimalnog rešenja sistema za odbranu od podzemnih voda od alternativa ponuđenih hidrodinamičkim modelom; ovim putem je u hidrogeologiji implementirana fazi optimizacija, tj. metoda fazi analitičko hijerarhijskog procesa, koja daje mogućnost donošenja rešenja problema u uslovima u kojima treba uvažiti postojanje više rešenja, najčešće suprostavljenih kriterijuma, pri čemu je rešenje predstavljeno izborom jedne od niza alternativa.

Kako se celokupno istraživanje razmatrano u tezi odnosi na tehničku oblast, koja se u svetu tokom poslednje decenije razvija velikom brzinom, očekuje se da će ovaj rad motivisati dalja istraživanja koja se tiču odbrane od podzemnih voda za različite potrebe, a zatim i odbrane od poplava. Sprovedeno istraživanje ukazuje na neophodnost multidisciplinarnog pristupa u povezivanju hidrogeologije sa drugim naučnim oblastima pored ovde prikazanih: povezivanja hidrogeologije i hidrodinamike sa fazi logikom, baziranoj na matematici i psihologiji, i povezivanja hidrogeologije i hidrodinamike sa višekriterijumskom optimizacijom (fazi optimizacijom) i sa odlučivanjem.

Sruktura doktorske disertacije. Doktorska disertacija se sastoji iz četiri celine. Prva celina obuhvata uvodni deo, a potom, s obzirom na to da ležišta mineralnih sirovina predstavljaju najkompleksniju problematiku s gledišta odbrane od podzemnih voda,

druga celina obuhvata teorijsku podlogu vezanu za sisteme odbrane od podzemnih voda na takvim područjima. Pored toga, druga celina obuhvata i prikaz naučnih metoda koje su korišćene u doktorskoj disertaciji - hidrodinamičke analize i primene fazi logike u hidrogeologiji. Treća celina obuhvata primenu naučnih metoda na primeru iz prakse, tj. na prikazanom istražnom terenu (površinski kop „Buvač“). Pored geoloških i hidrogeoloških karakteristika istražnog područja, prikazan je trodimenzionalni hidrogeološki model terena, zatim, hidrodinamički model sa procenjenim hidrogeološkim parametrima pomoću fazi kriginga, a potom i „eksploatacija“ modela, što podrazumeva kreiranje varijantnih rešenja sistema odbrane od podzemnih voda. Primenom višekriterijumske analize i odlučivanja, tj. primenom metode fazi optimizacije, proračunata je optimalna varijanta sistema odbrane od podzemnih voda. Naposljetku, četvrtu celinu čini zaključni deo.

II. TEORIJSKI DEO

U ovom delu prikazane su teorijska podloga i naučna metodologija, koje su primenjene u izradi doktorske disertacije. Drugo poglavlje se sastoji iz tri celine, koje su nadalje predstavljene u tekstu:

1. Sistemi odbrane od podzemnih voda
2. Hidrodinamička analiza režima podzemnih voda
3. Primena fazi logike u hidrogeologiji.

1. Sistemi odbrane od podzemnih voda

Odbrana od podzemnih voda predstavlja skup tehničkih mera kojima se na određenom području reguliše režim podzemnih voda (nivoi i doticaji) prema zadatim kriterijumima. Takođe, uključuje izgradnju sistema za odbranu kojim se vrši odvodnjavanje nekog područja. Sistemi za odbranu od podzemnih voda koriste se za zaštitu naselja, hidrotehničkih objekata, priobalja, meliorativnih područja i ležišta mineralnih sirovina (rudnici, površinski kopovi).

Najkompleksniju problematiku odbrane od podzemnih voda imaju ležišta mineralnih sirovina, a upravo iz navedenih razloga izdvojeni su površinski kopovi kao kvalitetan poligon za razmatranje primenjenih metodoloških postupaka u doktorskoj disertaciji, odnosno fazi optimizacije u hidronamičkom modeliranju.

U daljem tekstu su prikazane analize uslova, metode i sistemi za odbranu od podzemnih voda, kao i metodologija hidrogeoloških istraživanja vezanih za ležišta mineralnih sirovina. Zaključno, predstavljeni su faktori, tj. kriterijumi koji utiču na izbor objekata i karakteristika sistema za odbranu od podzemnih voda.

Počev od šezdesetih godina prošlog veka razvijaju se hidrogeološka istraživanja u Srbiji koja se bave izučavanjem hidrogeoloških uslova ležišta mineralnih sirovina. U Srbiji temelje o problemima i zadacima hidrogeologije ležišta mineralnih sirovina i odbrane

od podzemnih voda prvi su postavili: Damjanović (1965), Milojević & Filipović (1966), Filipović & Valjarević (1974), Jovičić & Čović (1975), a zatim savremenija tehnička i naučna dostignuća predstavili su Simić et al. (1984), Komatina (1990), Simić (1994), Dragišić (1995) i Pavlović et al. (2012). Strani eksperti čija istraživanja predstavljaju teorijsku podlogu ovog poglavlja su: Libicki (1985), Morton & van Mekerck (1993), Cashman & Preene (2001), Hartman & Mutmansky (2002), Younger et al. (2002), Wyllie & Mah (2004), Younger (2007), Deb (2013).

Za uspešnu zaštitu od podzemnih voda koristi se jedna ili više metoda odbrane i različiti objekti za odvodnjavanje. Kompleks svih radova i objekata kojima se vrši zaštita naziva se sistem odbrane od podzemnih voda, odnosno sistem odvodnjavanja. Zadatak sistema za odbranu od podzemnih voda kod ležišta mineralnih sirovina je da u svakom momentu obezbedi sigurnost rada na najnižoj etaži kopa, tj. da obezbedi suve uslove najniže etaže kopa. Dragišić (2005) navodi da sistem za odvodnjavanje rudarskih radova predviđa izbor šeme rasporeda drenažnih objekata u planu i profilu, vezanih za šemu izvođenja rudarskih radova, a pored toga podrazumeva i redosled izvođenja drenažnih objekata u sadejstvu sa dinamikom pripremnih i eksploatacionih radova i zavisi od niza prirodnih i veštačkih faktora, o kojima će biti dalje reči.

1.1. Analiza uslova za odbranu od podzemnih voda

Na područjima gde podzemne vode negativno utiču na ljudske radove potrebna je izgradnja sistema za odbranu. U naseljenim mestima, visoki nivoi podzemnih voda mogu ugrožavati stambene objekte ili uticati nepovoljno na geomehničke karakteristike tla, pa se javljaju njegove deformacije u vidu rušenja ili sleganja, a takođe i aktiviranja procesa kličanja kod tla koja imaju te predispozicije. Isti je slučaj i kod hidrotehničkih objekata. Na meliorativnim područjima visoki nivoi podzemnih voda dovode do zasićenja tla vodom i time ugrožavaju useve. Primer mera za sniženje nivoa podzemnih voda za potrebe izrade crpne stanice „Bezdan 1“ u Srbiji predstavili su Polomčić & Bajić (2014). Kako je istražno područje u doktorskoj disertaciji ležište mineralnih sirovina, detaljnije će biti prikazana analiza uslova za odbranu od podzemnih voda vezana za takva područja.

Tokom tehnološkog procesa eksploatacije mineralnih sirovina površinskim načinom, odbrana površinskih kopova od podzemnih voda, predstavlja jedno od ključnih pitanja koje treba rešavati. Sistem odbrane mora da bude projektovan i izvedan na taj način da pruža potpunu zaštitu kopa od podzemnih voda i omogućava nesmetan proces izdvajanja rude, a takođe da bude i ekonomičan. Uspešna odbrana zahteva primenu kompleksnog pristupa, kao i posedovanje znanja iz različitih disciplina koje se odnose na oblast geologije, pre svega hidrogeologije, a potom i dinamike podzemnih voda, mehanike stena, izrade bunara, hidrotehnike, kao i iz oblasti rudarstva, što podrazumeva poznavanje metoda eksploatacije rude.

U odnosu na problematiku odvodnjavanja dubokih rudnika prednost zadobija odvodnjavanje površinskih kopova, jer se može vršiti sa površine terena, što pruža veću sigurnost i ekonomičnost. Ukoliko je potrebno izvršiti veću eksploataciju rude i dostići radovima do velikih dubina, a zavisno od hidrogeoloških i hidroloških uslova na istražnom području, površinski kopovi u manjoj ili većoj meri bivaju ugroženi od podzemnih voda. Velika količina vode pogoršava fizičko-mehaničke osobine tla u kome se vrše radovi, a na taj način ugrožava i eksploataciju mineralnih sirovina, ljude i mehanizaciju.

Odbrana ležišta mineralnih sirovina, pratećih naslaga i sprečavanje stalnog doticaja podzemnih voda je veoma važno, kako bi se omogućilo nesmetano izvođenje radova na površinskim kopovima, transport rude i odlaganje otkopanih masa. Zaštita i sprečavanje prihranjivanja ležišta mineralnih sirovina podzemnim vodama pre svega zavisi od hidrogeoloških, a zatim i od hidrodinamičkih i hidroloških uslova u zoni eksploatacije i široj zoni ležišta.

Kako bi se odabrali elementi sistema za odbranu, koga čine objekti za odvodnjavanje i sprečavanje filtracije podzemnih voda, vrši se analiza sledećih uslova koji po značaju i stepenu složenosti imaju veći ili manji uticaj na njihov izbor (Simić et al., 1984; Pavlović et al., 2012):

- hidrološki uslovi šire zone ležišta,

- geološki uslovi šire zone ležišta,
- hidrogeološki uslovi šire zone ležišta,
- geomehanički uslovi i stabilnost kosina kopa i
- tehnologija eksploatacije rude i ostali rudarski radovi.

Treba naglasiti da poslednja stavka analize neće biti razmatrana, pošto spada u domen rudarstva, a obrađeni delovi o analizi uslova i objektima sistema za odbranu podzemnih voda predstavljaju osnovu za izdvajanje kriterijuma koji utiču na izbor elemenata sistema odbrane od podzemnih voda, a koji su bitni kod fazi optimizacije i izbora optimalne varijante sistema.

Hidrološki uslovi šire zone ležišta. Simić et al. (1984) navode sledeće hidrološke uslove kojima se ocenjuje ugroženost površinskih kopova od površinskih voda i veza površinskih voda sa podzemnim vodama:

- veličina slivnog područja istražnog terena i reljef u njegovom slivnom području,
- položaj površinskih tokova (stalni i povremeni), njihovi vodostaji i proticaji, posebno maksimalni i ekstremni
- sezonsko kolebanje nivoa površinskih tokova i proticaja,
- visine padavina,
- karakteristike površinskog tla u pogledu oticanja, isparavanja, vodoprovodnosti i infiltracije,
- prisustvo prirodnih i veštačkih akumulacija u široj zoni kopa,
- odnos površinskih tokova na podzemne vode i površinski kop.

Prvih šest stavki se mogu relativno lako utvrditi, dok poseban značaj predstavlja poslednja navedena stavka. Veliki broj površinskih kopova se nalazi u blizini površinskih tokova, pa samim tim izdani u okviru ležišta mogu biti u direktnoj ili indirektnoj hidrauličkoj vezi sa njima. Sprečavanje infiltracije rečnih i drugih površinskih voda u zoni površinskog kopa vrši se analizom i utvrđivanjem položaja rudnih naslaga i izdani u odnosu na površinski tok, kao i određivanjem stepena njihove

hidrauličke veze. Tim putem se ustanovljuje i stepen ugroženosti i veličina infiltracije površinskih voda, a samim tim mogućnosti i potrebe izmeštanja površinskih tokova. Libicki (1985) navodi da se površinski tokovi izmeštaju u vodonepropusna korita, kako bi se izbegla hidraulička veza između površinskih i podzemnih voda, tj. kako bi se izvršilo sprečavanje infiltracije površinskih voda u izdani na prostoru rudnog ležišta.

Prilikom istraživanja na rudnom ležištu „Buvač“ potvrđena je hidraulička veza između reke Bistrice i Gomjenice sa aluvijalnom izdani i sa izdani u rudnom telu (Bajić et al., 2012; Polomčić et al., 2013). Kako zbog nesmetanog razvijanja rudarskih radova, tako i zbog stepena ugroženosti rudnog ležišta od površinskih voda, izmešteni su tokovi van direktnog uticaja na kop (Polomčić & Bajić, 2015).

Od geoloških uslova kod ležišta mineralnih sirovina moraju se poznavati:

- litološki sastav i debljina ležišta i pratećih stena,
- tektonika šire okoline ležišta mineralnih sirovina,
- fizičke i mehaničke karakteristike, granulometrijski sastav i poroznost stena na prostoru ležišta mineralnih sirovina.

Hidrogeološki uslovi šire zone ležišta. Libicki (1985) je predložio hidrogeološke uslove koji su bitni kod izbora karakteristika sistema odbrane od podzemnih voda, a to su sledeći:

- debljina izdani,
- specifična izdašnost izdani (efektivna poroznost), kao i vodopropusnost (koeficijent filtracije) slojeva na ležištu mineralnih sirovina,
- prostorni raspored slojeva različitih vrednosti koeficijenta filtracije, s tim da je povoljnije kada su slojevi veće vodopropusnosti ispod onih sa manjom,
- hidraulička veza između izdani,
- uslovi prihranjivanja i prisustvo površinskih tokova blizu ležišta mineralnih sirovina,
- visina padavina i njihova prostorna raspodela tokom godine i

- tektonski strukturni oblici: nabori i rasedi.

Libicki (1985) navodi da se tokom analize hidrogeoloških uslova sve ove karakteristike moraju ispitati, s obzirom na to da predstavljaju nužan uslov za izbor elemenata sistema odbrane od podzemnih voda u pogledu maksimalne efikasnosti.

Takođe, Morton & van Meerk (1993) navode slične hidrogeološke uslove vezano za karakteristike vodonosnih slojeva:

- hidrodinamički tip izdani: slobodna izdan ili izdan pod pritiskom,
- prostiranje, debljina i uslovi prihranjivanja i isticanja prisutnih izdani u okviru ležišta mineralnih sirovina,
- koeficijent vodoprovodnosti i specifičnu izdašnost izdani,
- statički nivo izdani,
- sezonski potencijalni prilivi podzemnih voda.

Pored ovih hidrogeoloških uslova, Dragišić (2005) dodaje:

- vodonosnost pratećih stena u okviru ležišta mineralnih sirovina,
- stepen filtracione nejednorodnosti u planu i profilu i
- hemijski sastav podzemnih voda u ležištu.

Primećuje se da se različita mišljenja naučnika poklapaju u vezi sa analizom hidrogeoloških uslova, stoga se izdvajaju sledeći po kojima se vršila analiza na istražnom području doktorske disertacije:

- tipovi izdani na prostoru ležišta,
- nagib, debljina i prostiranje izdani,
- hidraulička veza podzemnih i površinskih voda,
- statički nivo izdani,
- veza između samih izdani na području površinskog kopa,
- položaj izdani u odnosu na rudu koja se eksploatiše,

- pravci kretanja podzemnih voda,
- hidrogeološki i hidrodinamički parametri, od kojih su najbitniji koeficijent filtracije i specifična izdašnost izdani,
- hemijski sastav podzemnih voda i
- količina voda: bilans podzemnih voda šire zone površinskog kopa.

Geomenički uslovi i stabilnosti kosina kopa imaju važnu ulogu kod odbrane površinskih kopova od podzemnih voda (Đukić 1984, Woodward, 2005), gde se posebno izdvajaju geomehničke karakteristike stena na izučavanom ležištu. Sve dok se ne razviju rudarski radovi prateće naslage ležišta pod uticajem podzemnih voda ne pokazuju nikakve deformacije, pošto u neporemećenom stanju postoji prirodna ravnoteža tla ispunjenog podzemnim vodama. Poznavanje karakteristika povlatnih naslaga ukazuje na njihovu sposobnost odvodnjavanja, stoga ako su prateće naslage peskovi i šljunkovi, moguće je njihovo efikasno odvodnjavanje. U vezi sa odvodnjavanjem pelitskih naslaga uzima se u obzir vreme i tehnologija odvodnjavanja. Kako je preporučio Simić et al. (1984), ovakve izdani se odvodnjavaju da bi se obezbedila potrebna nosivost i dovoljan nagib kosine etaže. Pored toga, odvodnjavanje se vrši i kako bi se snizio nivo podzemnih voda za nesmetan rad rudarske mehanizacije.

Stalna tendencija povećanja proizvodnje rude uticala je da se površinski kopovi spuštaju u sve veće dubine. Stoga, povećavanjem dubina površinski kopovi zauzimaju i sve veće površine terena. Veća količina vode u tlu utiče negativno na eksploataciju rude, jer pored toga što ugrožava ljude i mehanizaciju, pogoršava i fizičko-mehaničke osobine stena u kojima se izvođe rudarski radovi, što može da onemogući samu eksploataciju.

Analizom svih uslova koji su pomenuti, izdvojivši posebno hidrogeološke uslove, dobijena je jasna slika o istražnom području, koji predstavlja površinski kop. To je doprinelo donošenju pravilne odluke eksperta u pogledu karakteristika i elemenata sistema za odbranu od podzemnih voda. Ovi uslovi su analizirani tokom istraživanja na površinskom kopu „Buvač“, kako pregledom već izvršenih istraživanja (70-e godine prošlog veka), tako i služenjem novijim istraživanjima u periodu 2008-2012. god.

1.2. Hidrogeološka istraživanja za potrebe projektovanja sistema za odbranu od podzemnih voda

Prema osnovnim principima i etapama istraživanja u hidrogeologiji (Filipović, 1980), hidrogeološka istraživanja kod projektovanja sistema odbrane od podzemnih voda mogu se razvrstati na sledeći način:

- etapa osnovnih istraživanja koja obuhvata hidrogeološko rekognosciranje i osnovno hidrogeološko istraživanje u užem smislu,
- etapa detaljnih hidrogeoloških istraživanja koja obuhvata prethodna hidrogeološka istraživanja i detaljnija hidrogeološka istraživanja,
- etapa eksploatacionih hidrogeoloških istraživanja koja obuhvata hidrogeološka istraživanja u vreme realizacije sistema za odbranu od podzemnih voda i hidrogeološka istraživanja u vreme rada sistema za odbranu od podzemnih voda.

Ovaj princip se smatra opštepoznatim, a ujedno predstavlja i osnovu plana hidrogeoloških istraživanja na ležištu limonita „Buvač“.

Izvođenje rudarskih radova uglavnom se vrši ispod nivoa podzemnih voda, što prouzorkuje njihov priliv u rudnike - površinske kopove, čime se izazivaju opasnosti i javljaju poteškoće kod napredovanja rudarskih radova. Problemi nastali tom prilikom najčešće se tiču bezbednosnih uslova zaštite na radu, ali su vidljivi i pri rudarskim aktivnostima, uzrokujući teškoće pri pristupu rudi, smanjenje radnog veka mašina i pojavu nestabilnosti zidova pri iskopu. „Suvi“ uslovi za rad obezbeđuju stabilnost kosina etaža i omogućuju nesmetan rad, kako ljudi tako i mašina. Da bi se to postiglo, potreban je održiv plan odbrane od podzemnih voda.

Upravljanje podzemnim vodama i sprovođenje mera odbrane od podzemnih voda na površinskim kopovima vrši se najčešće odvodnjavanjem (drenažni bunari), izmeštanjem površinskih tokova kako bi se sprečila hidraulička veza sa izdanima, sprečavanjem

doticaja pomoću stvaranja barijera (vodonepropusni ekrani) ili kombinacijom ovih metoda (Morton & van Mekerck, 1993).

Postizanje optimalnosti u pogledu izbora sistema za odbranu od podzemnih voda leži u utvrđivanju „porekla“ podzemnih voda, što je direktno povezano sa režimom i bilansom izdani na istražnom području.

Istraživanja koja se sprovode kod površinskih kopova prikazali su Read et al. (2009), izdvojivši geološka, geofizička, geotehnička i hidrogeološka istraživanja kao bitna za buduće održivo upravljanje na površinskom kopu prilikom njegovog otvaranja. Deb (2014) se usredsređuje na hidrogeološka istraživanja primenljivih na rudnike, gde pored analize hidrogeoloških faktora, pruža i analizu geoloških, tehnoloških, geotehničkih i ekoloških faktora. Takođe, predstavio je hidrogeološke karakteristike površinskih kopova i dubokih rudnika kroz metode, procedure i opremu koja se koristi u rudničkoj hidrogeologiji. Pored toga, navodi i primere iz prakse, ukazujući na nekoliko rudnika i površinskih kopova u oblasti Indije.

Potencijalni prilivi podzemnih voda u rudnicima neretko se unapred mogu proceniti pomoću faza koje prethode izradi sistema odbrane od podzemnih voda. Morton & van Mekerck (1993) preporučuju da bi za te potrebe trebalo hidrogeološka istraživanje vršiti u tri faze.

- Prva faza predstavlja istraživanje i proučavanje rezultata svih dosadašnjih dostupnih informacija o izučavanom terenu. Ukoliko je moguće, ovu fazu bi trebalo sprovesti bez dodatnih istraživanja koji se odnose na izrade istražnih bušenja i istražnih radova (testova crpenja). Dodatna istraživanja i testovi se rade u slučaju da ne postoji dovoljno informacija, te se kao primarni cilj izdvaja utvrđivanje nivoa podzemnih voda i hidrogeoloških karakteristika istražnog područja. Stoga se hidrogeološka istraživanja vrše uporedo sa geološkim istraživanjima. U oblastima gde podzemne vode predstavljaju ranjivi resurs, vrši se i procena rudarskih aktivnosti na lokalne izdani i

eventualno zagađenje podzemnih voda, pa se tim putem stiče osnovna slika o istražnom području.

- Druga faza treba da ukaže na međusobne odnose između ležišta mineralnih sirovina i podzemnih voda. Step en njihovih međusobnih odnosa direktno utvrđuje nivo istraženosti i kvalitet i kvantitet dobijenih podataka tokom prve faze hidrogeoloških istraživanja. Potrebno je da se utvrde tipovi izdani, njihovo rasprostranjenje, uslovi hranjenja i isticanja izdanskih voda. Takođe, u ovoj fazi rade se nove istražne bušotine i bunari za testove crpenja, kako bi se dobila detaljna slika o istražnom području i kako bi se odredili parametri hidrogeološke sredine. Postavljanjem osmatračkih mreža pijezometara na prostoru ležišta mineralnih sirovina vrši se praćenje nivoa podzemnih voda, čime bi se detaljno utvrdio režim izdani. Završetak faze vezuje se za hidrodinamičku analizu režima podzemnih voda i prikaz bilansa izdani, što obezbeđuje procenu količina podzemnih voda šire zone površinskog kopa. Ova faza predstavlja dokazivanje ili opovrgavanje štetnog uticaja podzemnih voda na rudarsku aktivnost, što uslovljava prelazak na treću fazu.
- U trećoj fazi se pravi projekat sistema odbrane od podzemnih voda. Cilj je da se obezbedi odbrana ležišta od podzemnih voda iz prisutnih izdani, kako bi se vršila eksploatacija rude. Glavnu ulogu u ovom slučaju zadobijaju iskustvo eksperta i izrada varijantnih hidrodinamičkih proračuna i rešenja za ceo vek eksploatacije ili planirani vremenski period eksploatacije rude na ležištu.

Kao što je naglašeno, u mnoštvu značajnih faktora analize uslova za odbranu površinskih kopova od podzemnih voda posebno se izdvajaju hidrogeološki uslovi. Kao posledica nedovoljno dobre istraženosti terena javljaju se problemi i neefikasan rad sistema za odbranu od podzemnih voda, te je u tom pogledu bitno pristupiti hidrogeološkim istraživanjima fazno, kako je predhodno predstavljeno.

Stoga su prema predlogu navedenih faza izvršena hidrogeološka istraživanja na površinskom kopu „Buvač“. To podrazumeva prikupljanje svih podataka od početka njegovog radnog veka, izradu hidrogeološkog modela (Bajić & Polomčić, 2008), a

zatim i izradu hidrodinamičkog modela (Polomčić, 2008; Polomčić et al., 2012). Naposljetku, vršena su nova istraživanja za period od 2008. do 2012. god., gde je za nove uslove urađeno inoviranje hidrodinamičkog modela (Polomčić & Bajić, 2015).

1.3. Odbrana i metode odbrane od podzemnih voda

Odbrana od podzemnih voda podrazumeva skup svih inženjerskih mera kojim se vrši zaštita nekog područja ili objekta, što uključuje: naselja, priobalja, meliorativna područja, ležišta mineralnih sirovina i hidrotehničke objekte. S obzirom na to da istražno područje doktorske disertacije predstavlja površinski kop, pažnja je usmerena na problematiku i metode odbrane od podzemnih voda takvih objekata. Odbrana površinskih kopova od podzemnih voda predstavlja sveobuhvatnost mera, usklađenih sa dinamikom rudarskih radova po prostoru i vremenu, koje se preduzimaju u cilju izvođenja odvodnjavanja ili sprečavanja doticaja postavljanjem barijere pomoću objekata za odbranu.

Pored direktnog ugrožavanja površinskih kopova potapanjem, podzemne vode utiču i indirektno na fizičko-mehaničke osobine stena na taj način što gube dotadašnje osobine i postaju nepodesne za eksploataciju, transport, preradu ili odlaganje. Zadatak odbrane ležišta mineralnih sirovina od podzemnih voda podrazumeva da se rude u ležištu dovedu u takvo stanje da ih je moguće tehnički i ekonomski opravdano eksploatirati, transportovati, obrađivati uz primenu odgovarajuće rudarske tehnologije.

Problematici odbrane površinskih kopova od podzemnih voda potrebno je prići planski i sistematski radi izbora odgovarajuće metode čija realizacija treba da opravda funkcionalnost i ekonomičnost eksploatacije, kao i nepostojanje negativnih efekata na životnu sredinu. U zavisnosti od količine podzemnih voda, fizičko-mehaničkih karakteristika stena i rudarske tehnologije, metode odbrane površinskih kopova od podzemnih voda se razlikuju među sobom, a cilj svake je da pored odvodnjavanja određenih delova sredine, ustanovi i potpuno obezbeđivanje i izvođenje tehnološkog procesa eksploatacije rude, kao i omogućavanje nesmetanog odlaganja jalovine.

Libicki (1985) je na osnovu potrebe za odbranom od podzemnih voda podelio površinske kopove na dve grupe:

- površinski kopovi na kojima se eksploatacija rude vrši iznad nivoa podzemnih voda i
- površinski kopovi na kojima se eksploatacija rude vrši ispod nivoa podzemnih voda.

Prema prvoj grupi odbrana od voda vrši se crpljenjem, ukoliko je podina vodonepropusna ili pak nema potreba za odvodnjavanjem, ukoliko se vode proceduju vertikalno naniže usled vodopropusne podine. Uglavnom su to vode koje su nastale od padavina. Druga grupa je kompleksnija, te je delimo na dve podgrupe. Prva podgrupa obuhvata površinske kopove koji se sastoje od čvrstih stena, kako vodopropusnih tako i vodonepropusnih, a po geotehničkim karakteristikama imaju manji rizik od hazarda kod stabilnosti kosina. Druga podgrupa obuhvata površinske kopove koji sadrže nevezane i nekonsolidovane sedimente, a oni mogu imati dobru vodopropusnost (peskovi i šljunkovi), zatim vodonepropusne sedimente (gline) i srednje vodopropusne sedimente (prašinski sedimenti), gde je veći rizik od hazarda.

Dragišić (2005) navodi dve metode odbrane od podzemnih voda u odnosu na eksploataciju mineralnih sirovina, a to su:

- prethodno odvodnjavanje i
- eksploataciono odvodnjavanje.

Prethodno odvodnjavanje predstavlja obaranje nivoa podzemnih voda sa površine terena, a primenjuje se kod ležišta sa manjom dubinom zaleganja sa stenskim masama koje imaju dobro razvijenu vodonosnost. Prethodno odvodnjavanje se izvodi u fazi pre otvaranja ležišta, neposredno pri detaljnom utvrđivanju hidrogeoloških karakteristika istražnog područja i određivanja bilansa podzemnih voda. Objektima za odbranu, koje najčešće predstavljaju drenažni bunari, postavljenim po obodu ležišta, vrši se sniženje nivoa podzemnih voda ispod eksploatacione granice ležišta. Bez obzira na nepovoljnu

ekonomičnost, ova metoda odbrane od podzemnih voda podrazumeva regulaciju i izmeštanje rečnih tokova, koje se zbog ekonomičnosti najčešće radi fazno, a zatim i izradu kanala, vodonepropusnih ekrana i horizontalnih drenaža, koje obezbeđuju teren za odlaganje rudne jalovine. Eksploataciono odvodnjavanje je nastavak tzv. prethodnog odvodnjavanja. Ono se vrši paralelno sa eksploatacijom ležišta mineralnih sirovina, a proces odbrane od podzemnih voda se vrši slično kao i kod prethodnog odvodnjavanja.

Polomčić et al. (2013) prikazuju jedan primer predodvodnjavanja budućih površinskih kopova na prostoru kolubarskog ugljenosnog basena u Srbiji. U te svrhe korišćeno je izvoriste podzemnih voda „Peštan“, koje se nalazi na centralnom delu basena, na „Polju F“. Prilikom rada izvorišta došlo je do značajnih sniženja podzemnih voda u zoni izvorišta, gde je za 12 godina oboren nivo podzemnih voda za oko 54 m. I pored rada izvorišta, kako je navedeno, na ovu veličinu obaranja nivoa podzemnih voda uticalo je i presecanje izvora prihranjivanja „međuslojne“ izdani, usled razvoja okolnih površinskih kopova.

Mere koje se vrše pre eksploatacionog odvodnjavanja, a koje spadaju u metode prethodnog odvodnjavanja su i izmeštanja rečnih korita. Simić et al. (1999) objašnjavaju proces izmeštanja površinskih tokova, te se uviđa da ta kompleksna hidrotehnička aktivnost obuhvata izradu novog korita van granica površinskog kopa, tj. rudarskih radova, a zatim izradu zaštitnih nasipa sa obe strane novog korita, kao i zatrpavanje starog korita neposredno u tačkama račvanja i spajanja starog i novog regulisanog rečnog toka. Jagodić & Jovičić (2007) i Buhač et al. (2012) bavili su se izmeštanjem rečnog korita Kolubare zbog uticaja na otvaranje novih otkopnih polja „Veliki Crljeni“ i „Južno Polje“ u kolubarskom ugljenosnom basenu u Srbiji. Proces izmeštanja rečnog korita odvijao se u tri faze, prateći dinamiku rudarskih radova. Korito je premešteno iz sopstvenog aluvijona u sredinu duž odlagališta jalovine, pa kao takav predstavlja primer koji je do sada nije bio prisutan u domaćoj praksi, a takođe, ne postoji puno primera ni u evropskoj praksi, kako u tehničkom, tako i u tehnološkom i organizacionom smislu. Stevanović et al. (2013) prikazali su izmeštanje dela korita reke Peštan. S obzirom na to da reka protiče preko eksploatacionog polja, izmeštanje i regulacija prirodnog vodotoka je neophodna zbog otvaranja površinskog kopa „Polje E“ u kolubarskom basenu. U radu

su dati lokacija i tehničko rešenje izmeštanja, ali i uslovi koji moraju biti zadovoljeni kako ne bi došlo do infiltracije rečnih voda u površinski kop. Pored toga, predviđeni su i zahtevi za kontrolu poplava aktivnim merama na delu toka uzvodno od eksploatacionog područja. Mnogobrojne primere izmeštanja rečnih tokova sa površinskih kopova prikazuju Pavlović et al. (2012), a uvezi sa izmeštanjem dela rečnog toka Velike Morave i Mlave na kostolačkom ugljenosnom basenu u Srbiji i dela rečnog toka reke Gračanice na površinskom kopu „Gračanica“ (Kosovo). Pored standardne metode izmeštanja rečnog korita - iskopa novog rečnog korita van površinskog kopa, Pavlović et al. (2012) prikazuju premeštanje dela rečnog toka reke Čehotine na površinskom kopu „Potrlica“ u Crnoj Gori kroz tunel „Rudine“ i tunel „Velika Pliješ“.

U vezi sa istražnim područjem doktorske disertacije napominje se da se reke Gomjenica i Bistrica nalaze direktno iznad ležišta limonita „Buvač“ i stoga predstavljaju opasnost za rudarske radove. Na taj način pristupilo se faznom izmeštanju njihovih korita iz zone rudarskih radova, što predstavlja početnu, ali veoma značajnu fazu zaštite površinskog kopa „Buvač“ od površinskih i podzemnih voda (Polomčić & Bajić, 2015).

Postoje još neke podele metoda odbrane od podzemnih voda. Jedna od njih je na osnovu dela sredine, gde treba da se zaštiti i spreči priliv podzemnih voda pri napredovanju rudarskih radova, pa tako može predstavljati zaštitu površinskog kopa (povlate, podine i rudnog tela) i odlagališta. Što se tiče podzemnih voda u povlati, ističe se njihov uticaj na stabilnost kosina, pošto voda može izazvati kretanje stenskih masa i ugrožavati rudare, otkopno-utovarnu i transportnu mehanizaciju. Takođe, vode u podinskom delu naslaga mogu ugroziti tehnološki proces prodiranjem u radnu zonu površinskog kopa, posebno ako su podzemne vode pod pritiskom, kao u slučaju površinskog kopa „Buvač“ (Polomčić, 2008).

Prema predmetu odbrane u vezi sa površinskom eksploatacijom podela metoda odbrane se vrši na (Simić, 1984):

- metode odbrane površinskih kopova i
- metode odbrane odlagališta.

Razlika između odbrane površinskih kopova i odbrane odlagališta je u tome što se kod prvih odvodnjava netaknuta sredina, gde je veći priliv i površinskih i podzemnih voda, a kod drugih se odvodnjava heterogena rastresita odložena masa, gde se odvodnjavaju i manje zone nego kod slučaja površinskih kopova. Predmet odbrane površinskog kopa „Buvač“ je prva pomenuta metoda.

Podela metoda zaštite površinskih kopova vrši se uzev u obzir veći broj kriterijuma, te tako nastaje više osnova za klasifikaciju. Najčešće, to je podela na osnovu tipa ležišta i njegovih hidrogeoloških karakteristika, složenosti ležišta ili npr. objekata kojim se vrši odvodnjavanje kopa (Pavlović et al., 2012). Shodno tome, Abramov & Skirgelo (1968) dele metode odbrane zavisno od vrste ležišta, koja se dele na četiri grupe. U prvu grupu spadaju ležišta koja imaju jednostavne uslove odvodnjavanja, vršenog površinskim objektima (uglavnom zaštitnim obodnim kanalima ili pomoću bunara). Dok se u drugu, treću i četvrtu grupu ubrajaju ležišta složenih i veoma složenih uslova odvodnjavanja, koja se vrše površinskim i podzemnim načinom, stoga se predlaže kombinovanje metoda.

Dragišić (2005) navodi kako se metode odbrane ležišta mineralnih sirovina od podzemnih voda, bilo kod površinske ili pak kod podzemne eksploatacije, dele na dve metode, uključujući i njihove podmetode:

- podzemno odvodnjavanje:
 - otvoreno odvodnjavanje
 - sniženje nivoa podzemnih voda iz podzemnih radova
- površinsko odvodnjavanje:
 - otvoreno odvodnjavanje
 - sniženje nivoa podzemnih voda sa površine terena.

Razlike između metoda i podmetoda se prepoznaju u vrsti objekata odbrane, tj. objekata za odvodnjavanje, koji su opisani u poglavlju II-1.4. Pošto je istražno područje doktorske disertacije usmereno na površinski kop, posebno se izdvaja metoda površinskog odvodnjavanja, uzev u obzir da se metode podzemnog odvodnjavanja na

površinskim kopovima ređe primenjuju (Pavlović et al., 2012). Otvoreno odvodnjavanje podrazumeva u slučaju dveju metoda dreniranje kako podzemnih tako i površinskih voda, ali će se ovde izuzeti metode odbrane od površinskih voda, pošto se odbrana površinskog kopa „Buvač“ preduzima u vezi sa podzemnim vodama iz aluvijalne izdani i izdani iz rudnog tela, kako je prikazano prema bilansu tih izdani (Polomčić, 2008; Bajić et al., 2013).

Dragišić (2005) izdvaja i „specijalne“ metode odvodnjavanja, navodeći tzv. metodu elektroisušivanja, ali napominje se da je ona izgubila primenu. Takođe, uz ovu metodu navodi i primenu „protivfiltracionih zavesa“.

Prilikom odbrane površinskih kopova od podzemnih voda treba postupati pažljivo, uzev u obzir da usvajanje neadekvatnih metoda i mera može da izazove niz loših posledica, koje imaju uticaj na dinamiku eksploatacije i ekonomičnost čitavog rudarsko-tehnološkog procesa. Takođe, neophodna je pažljivost, s obzirom na to da odvodnjavanje ima veliki uticaj na užu i širu okolinu kopa. Neretko dolazi do velikog sniženje nivoa izdani, posebno kod kopova kod kojih su prisutne zatvorene hidrogeološke strukture sa veoma otežanom vodozamenom.

1.4. Elementi sistema odbrane od podzemnih voda

Za snižavanje nivoa podzemnih voda u procesu predodvodnjavanja ležišta mineralnih sirovina, kao i za sprečavanje priliva podzemnih voda u radnim etažama površinskog kopa i za odvođenje podzemnih i površinskih voda iz površinskog kopa koriste se više metoda i mera opisanih u prethodnom poglavlju. Stoga su u ovom delu opisani elementi sistema odbrane od podzemnih voda.

Sistem odbrane površinskih kopova od podzemnih voda čine njegovi elementi, tj. objekti za odbranu kojima se vrši obaranje nivoa podzemnih voda ili sprečavanje filtracije podzemnih voda. On se može sastojati od više istih ili različitih objekata, koji kao takav skup predstavljaju osnovu sistema odbrane površinskih kopova od podzemnih voda.

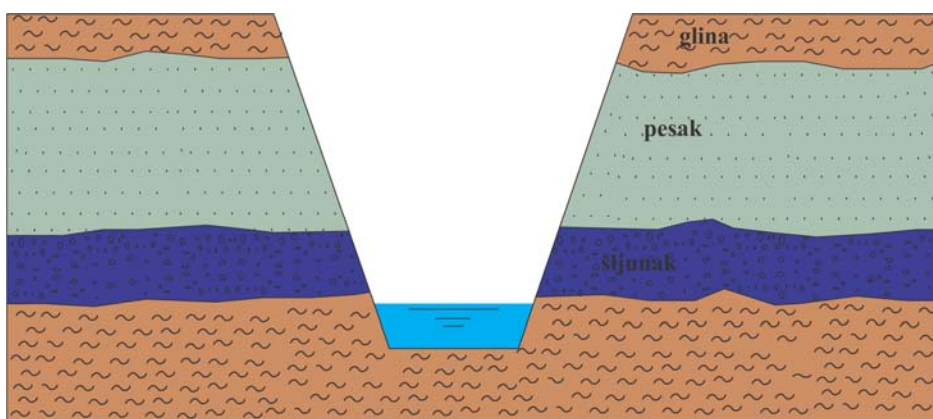
Elemente sistema odbrane od podzemnih voda koji se koriste na površinskim kopovima, predstavili su Simić et al. (1984) i Pavlović et al. (2012). Prema njihovoj podeli sistem odbrane površinskih kopova se sastoji od „objekata i uređaja“ za odbranu od površinskih voda, kao i od „objekata i uređaja“ za odbranu od podzemnih voda i za sprečavanje filtracije voda i za odvođenje voda. Vodeći se ovom podelom, glavni objekti za odbranu su: vodonepropusni ekrani, useci, drenažni bunari, kanali, vodosabirnici, pumpne stanice i bušotine, a „osnovni uređaji“ su: pijezometri, pumpe, cevovodi, šahte i filteri. Ukoliko se kritički posmatra, primećuje se da se sa hidrogeološkog aspekta pijezometar ne može smatrati „uređajem“ sistema odbrane, već predstavlja osmatrački objekat.

Zaključno, analizom brojnih bibliografskih jedinica iz oblasti rudarstva i hidrogeologije ležišta mineralnih sirovina (Kecojević, 2000; Cashman & Preene, 2001; Wyllie & Mah 2004; Dragišić, 2005) prikazuju se elementi sistema za odbranu od podzemnih voda na ležištima mineralnih sirovina, tj. na površinskim kopovima:

- useci,
- kanali,
- vodosabirnici,
- crpne stanice,
- gravitacijski cevovodi,
- šahte,
- bušotine,
- drenažni bunari,
- vodonepropusni ekrani,
- okna,
- iglofilteri, usadni filteri, sprovodni filteri, vakuum filteri,
- horizontalne drenažne prostorije - hodnici,
- zaštitni nasipi i
- horizontalne drenaže (drenažne cevi, rovovi, horizontalni drenovi).

Sistemi sa drenažnim bunarima i vodonepropusnim ekranima su glavni elementi sistema za odbranu od podzemnih voda koji se koriste na istražnom području površinskog kopa „Buvač“, stoga zadobijaju posebnu pažnju, dok su ostali elementi sistema ukratko prikazani.

Useci su drenažni objekti koji se koriste za odbranu delova površinskih kopova koji su ugroženi podzemnim vodama u okviru samog kopa ili na njegovim bokovima. Izgrađuju se sa površine terena ili sa nivoa etaže do vodonepropusnih stena. Funkcija im je da obezbede odvodnjavanje vodonosne sredine u fazi otvaranja površinskih kopova, pa se nazivaju i useci otvaranja. Šematski prikaz useka dat je na slici II-1.1.



Slika II-1.1: Usek

Kanali predstavljaju u sistemima odbrane objekte koji služe za zaštitu površinskih kopova od površinskih voda, koje se slivaju u zoni kopa, takođe, služe i za prikupljanje procednih podzemnih voda na etažama (Simić, 1984). Kanal se izrađuje kroz vodonosnu seriju do vodonepropusne sredine, s tim da se dno kanala izrađuje u vodonepropusnoj sredini, radi prikupljanja isteklih voda. Prema funkciji vrši se podela na obodne ili zaštitne kanale i na etažne kanale, koji se izrađuju unutar gravitacionog područja površinskog kopa (Dragišić, 2005), a šematski prikaz takvog kanala dat je na slici II-1.3. Najpogodnija primena kanala nalazi se u sredinama koje se sastoje od šljunkovitih ili peskovito-šljunkovitih naslaga. Buhač et al. (2012) prikazuju rešenje za prihvatanje i odvođenja svih voda koje gravitiraju ka radnom području površinskog kopa “Južno Polje” kolubarskog basena u Srbiji. To rešenje podrazumeva iskorišćavanje

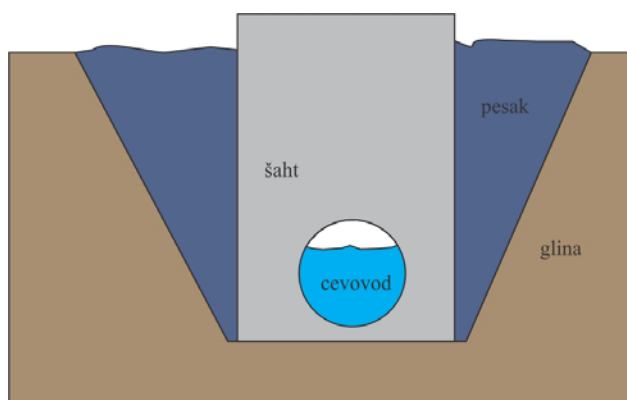
starih korita izmeštenih reka u svrhu obodnih kanala, koji predstavljaju ujedno i taložnik, te se preko nasipa u izmeštenu reku dovodi voda crpenjem centrifugalnim pumpama. Podzemne vode u povlatnim naslagama se pojavljuju kao statičke vode koje treba drenirati, pa se tim povodom koriste etažni kanali za gravitaciono isticanje.

Vodosabirnici su elementi sistema za odbranu koji služe za prikupljanje i površinskih i podzemnih voda, a obično se izrađuju na najnižim etažama površinskog kopa. Pored toga, mogu se izraditi u projektovanim konturama površinskog kopa, van kontura i pod zemljom (Simić et al, 1984). Važnost zadobija izbor lokacije vodosabirnika, kako u pogledu ekonomskog aspekta opreme za odvođenje voda tako i u pogledu aspekta zapremine prostora u kome se locira vodosabirnik. U slučaju većih površinskih kopova vodosabirnici se izgrađuju tako da obezbede siguran i kontinualan rad celokupnog sistema za evakuaciju prikupljenih voda u radnoj zoni površinskog kopa. Vodosabirnici se dimenzionišu na osnovu količine površinskih i podzemnih voda koje dotiču u konturu površinskog kopa, ali i na osnovu odabranog kapaciteta pumpi koje treba da evakušu vodu. Pavlović & Šubaranović (2012) navode kako se kod manjih površinskih kopova, posebno brdskog tipa, uglavnom upotrebljavaju ovakvi jednostavniji elementi sistema odbrane od voda. Tim putem se kanalima podzemne i površinske vode odvede gravitaciono van kontura kopa, a ako su uslovi složeniji, koriste se i vodosabirnici do kojih se odvede vode i isumpavaju van površinskog kopa.

Crpne stanice predstavljaju element sistema odbrane od podzemnih voda, obuhvatajući **pumpe** i **cevovode** (Pavlović et al., 2012). Njihov zadatak je da prebace vodu iz vodosabirnika van štice zone. Ukoliko ne postoji vodosabirnik, pristupa se serijskim vezivanjem pumpi, tako da potisni cevovodi pumpi sa nižih pumpnih stanica budu povezani sa usisnim priključcima pumpi na višim pumpnim stanicama. Prednost ovakvog načina rada vidljiva je, pošto se ne zahteva izgradnja vodosabirnika, no naglašava se da se pritom povećava kapacitet pumpi, kao i da dolazi do pojave tehničkih problema u vezi sa zastojem kod celokupnog sistema vezanih pumpi. Simić & Kecojić (1997a) navode da kod projektovanja crpnih stanica moraju biti ispunjeni sledeći uslovi:

- glavna crpna stanica mora imati rezervu pumpnih uređaja od 100% i njen kapacitet mora da obezbedi ispumpavanje doteklih voda od 24 h za najviše 20 h;
- motori pumpnih agregata glavne pumpne stanice moraju biti snabdeveni energijom iz dva nezavisna izvora;
- ako podzemne vode sadrže u sebi nagrizujuće komponente tada se moraju primenjivati pumpe i cevovodi od otpornog materijala;
- kapacitet vodosabirnika glavne pumpne stanice mora da primi desetočasovni normalni prtok vode, dok vodosabirnik podzemne glavne pumpne stanice mora da primi dvočasovni normalni prtok podzemnih voda;
- vodosabirnici i taložnici moraju imati pokazivače nivoa voda;
- prenosni pumpni uređaj mora da ima bar za 20% veći kapacitet od mogućeg priliva voda.

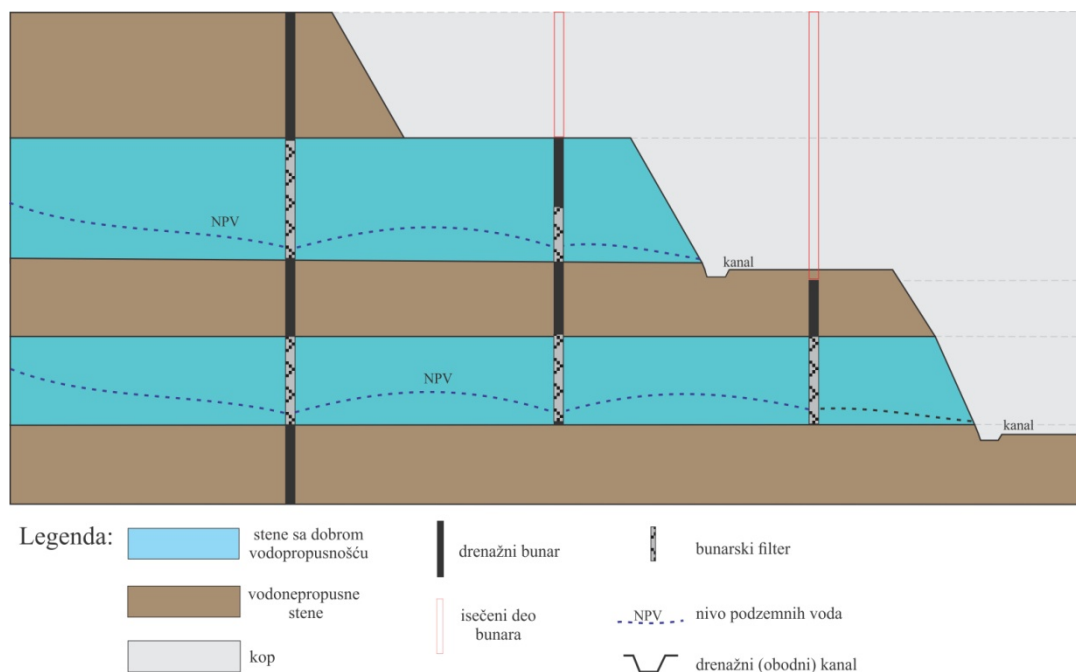
Pored cevovoda koji predstavlja deo crpnih stanica, odvođenje voda iz unutrašnjeg prostora površinskog kopa u prostor van njega vrši se **gravitacionim cevovodima** za sve vrste voda koje se drenažnim objektima sakupljaju u prostoru kopa. Mogu biti ukopani, postavljeni na površini terena ili na nasipu, a izrađuju se od metala, betona ili plastike. Sabirni objekti kojima se omogućava povezivanje cevovoda su **šahte** (slika II-1.2). Mogu biti betonske ili plastične, a pomoću njih se obezbeđuje nesmetano funkcionisanje sabirnog sistema u slučajevima skretanja trase ili promene prečnika cevovoda.



Slika II-1.2: Ugradnja cevovoda povezivanjem sa šahtom i zatrpavanjem

Bušotine se kao objekti za odbranu od podzemnih voda koriste za gravitaciono dreniranje viših vodonosnih horizonata u niže u čvrstim stenama. Da bi se primenila odbrana bušotinom, donji vodonosni horizont mora da ima niži pijezometarski nivo, kako bi mogao da primi vodu koja dolazi iz bušotine (Dragišić, 2005). Bušotine se mogu postavljati i horizontalno, što podrazumeva postavljanje sa etaža u dubinu vodonosne serije, stvarajući na taj način depresiju i sprečavajući isticanje podzemnih voda na kosinama površinskog kopa, te se tim putem održava njihova stabilnost. Iako su one svrstane u sporedne elemente sistema za odbranu od podzemnih voda (Simić et al., 1984), Stepanović et al. (2011) navode da horizontalne bušotine nisu ni do sada korišćene u Srbiji u svrhe odbrane od podzemnih voda (izuzev slučaj eksperimentalne bušotine na površinskom kopu „Drmno“), no važno je da navode primere iz svetske prakse u kojima je upotreba horizontalnih bušotina imala značajan status, a negde i presudan uticaj kod obezbeđivanja stabilnosti kosina na površinskim kopovima. Pored pomenutih namena, bušotine se koriste i kao objekti za postavljanje utisnih, sprovodnih, vakuum, iglofiltera i drugih filtera (Simić et al., 1984).

Drenažni bunari predstavljaju elementi sistema za odbranu površinskih kopova od podzemnih voda koji se u najvećoj meri primenjuju. Pod njima se podrazumevaju vertikalne bušotine većeg prečnika u koju se ugrađuje bunarska konstrukcija, filter i oprema za crpenje (pumpa), gde se kao specifična karakteristika izdvaja kapacitet tj. izdašnost (slika II-1.3), ukoliko se posmatra aspekt odbrane. Napominje se da bunari predstavljaju osnovu sistema za odbranu od podzemnih voda kod površinskog kopa „Buvač“. Kako navode Simić & Kecojević (1997b), drenažni bunari su veliku primenu dobili kod površinskih kopova sa većom dubinom, gde se nekoliko desetina metara od površine nalaze vodonosne naslage, koje imaju visoku vrednost koeficijenta filtracije. Ovo je slučaj koji karakteriše i bunare u rudnom telu površinskog kopa „Buvač“. U određenim okolnostima, kao na primeru površinskog kopa „Buvač“, dolazi do toga da se neretko jednim bunarom kod površinskih kopova sa složenim hidrogeološkim uslovima povezuje više vodonosnih horizonata, a na taj način se sprečava prihranjivanje naslaga u radnoj zoni površinskog kopa.



Slika II-1.3: Drenažni bunari kao elementi sistema odbrane od podzemnih voda

Prednost korišćenja drenažnih bunara ogleda se u manjim investicionim ulaganjima, potom u jednostavnoj i brznoj izradi, kao i u činjenici da poseduju prostu dinamiku rada, što podrazumeva jednostavno uključivanje u rad i isključivanje iz rada. Nedostaci korišćenja drenažnih bunara su vidljivi u maloj efikasnosti koja se javlja kada je sredina slabo vodopropusna, kao i u potražnji za radnom snagom koja će raditi na održavanju bunara i pumpi. Tada se rešenje ukazuje u pristupu automatizacije, ugrađivanju specijalnih filtera i pumpi velikih izdašnosti, potom i u izradi bunara velikih prečnika, što podrazumeva prečnik veći od 1 m. Šubaranović et al. (2007) opisuju tehnno-ekonomsku opravdanost izrade i održavanja sistema odbrane od podzemnih voda, koji bi se sastojao od ukupno 253 drenažna bunara na površinskom kopu „Drmno“ za period od 16 godina (2006-2022. god.). Takođe, prikazane su prednosti i nedostaci pomenutog sistema odbrane od podzemnih voda. Tom prilikom je navedeno da se za svaki bunar postavlja i jedna pumpa koja se mora održavati na 12 meseci, a menjati na 5 godina, kao i to da tehnno-ekonomska analiza podrazumeva: izradu, servis i održavanje drenažnih bunara, periodičnu regeneraciju, zatim i izradu odvodnih cevovoda, potrošnju električne energije i radnu snagu.

Drenažni bunari se često postavljaju i u nizu, tj. liniji, pa tako može postojati i više linija bunara, čija se izrada i vreme uključenja unapred određuje, pomoću primene hidrodinamičke analize. Funkcije linija bunara u sistemima odvodnjavanja prepoznaju se u sprečavanju priliva podzemnih voda u površinski kop i u obaranju nivoa podzemnih voda na zadatu kotu u određenom vremenu. Sistemi odvodnjavanja linijama bunara predstavljaju složeni kompleks koji je sastavljen od delova kao što su: bunarske konstrukcije, pumpe, cevovodi, trafo-stanice, kablovi, rezervni delovi i sistemi za napajanje električnom energijom. Drenažni bunari se mogu postavljati na površini terena ili na površini etaža, pa su shodno tome tzv. površinski i etažni bunari. Po funkcionalnosti i konstrukciji ove dve vrste bunara se ne razlikuju, s tim da su etažni bunari dobili ovaj naziv, pošto se izvode sa nivoa etaže površinskog kopa. U zavisnosti od nivoa etaže površinskog kopa, ovi bunari mogu biti duboki od par desetina metara do nekoliko stotina metara. Prečnik bušenja se kreće približno od 350 mm do 1200 mm, dok kapaciteti bunara mogu biti u različitom rasponu u zavisnosti od koeficijenta vodoprovodnosti, debljine izdani i uslova predodvodnjavanja, od 1 l/s pa čak do 150 l/s (Libicki, 1985). Glavni delovi ovakvog sistema bunara su potapajuće pumpe sa adekvatno izabranim karakteristikama (kapacitet, visina dizanja, snaga). Sistem odbrane od podzemnih voda sačinjen od drenažnih bunara često ima i dodatne elemente za odbranu od podzemnih voda, kako bi se što efikasnije izvršilo odvodnjavanje, pa tako uz njih najčešće idu horizontalne bušotine, kanali, drenažni nasipi, vodonepropusni ekrani itd.

Pored navedenog, uzevši u obzir ekonomsku isplativost, drenažni bunari se često seku (skraćuju) uporedo sa napredovanjem zone otkopavanja po dubini, a potom nastavljaju sa obavljanjem svoje funkcije, predstavljene u obaranju nivoa podzemnih voda (slika II-1.3).

Još nekoliko zaključaka, a u vezi sa primenom drenažnih bunara kao elemenata sistema odbrane podzemnih voda, iznose Polomčić & Šubaranović (2006) na osnovu iskustva prilikom rada na ležištu uglja Drmno u Srbiji, kao i Polomčić & Bajić (2015) na osnovu iskustva prilikom rada na ležištu limonita „Buvač“. Zapažanja podrazumevaju njihov

način zadavanja u prognoznim proračunima, koji je posledica sledećih kriterijuma i ograničenja:

- vek trajanja bunara koji se nalaze na pravcu fronta napredovanja kopa zavisi od dinamike napredovanja otkopavanja otkrivke. Tokom vremena napretka etaže otkrivke, kapacitet bunara se postepeno smanjuje do konačnog isključenja, odnosno do uništenja bunara;
- bunari duž obodnih linija na površinskom kopu se ne uništavaju, nego ostaju u radu sve dok se sloj koji kaptiraju na lokaciji gde se nalaze ne osuši. Potom se njihovi kapaciteti smanjuju tokom vremena, ali sporije nego kapaciteti bunara u okviru iskopavane otkrivke;
- početni kapaciteti bunara ne smeju da budu preveliki, jer se ne postiže željeni efekat odvodnjavanja tako da se i pored naglog sniženja nivoa u bunaru, u njegovoj okolini ne formira odgovarajuća depresija što je uglavnom posledica filtracionih i granulometrijskih karakteristika porozne sredine povlatnih sedimenata;
- paralelno sa postepenim ocedivanjem i opadanjem nivoa podzemnih voda duž baraža, proticaji bunara se smanjuju na odgovarajući način; potrebno je ostvariti balans između proticaja bunara i sniženja nivoa, kako u njemu i njegovoj neposrednoj okolini, tako i u široj zoni svake od baraža.

Upotrebu **horizontalnih bunara** za odbranu površinskih kopova od podzemnih voda prikazali su Mansel et al. (2012), koji u radu opisuju metodu izrade takvih bunara, što podrazumeva horizontalno usmereno bušenje (eng. „horizontal-directional-drilling“) i varijante njihove ugradnje, u zavisnosti od geoloških i hidrogeoloških karakteristika porozne sredine. Kao jedna od najzanimljivijih opcija se izdvaja povezivanje horizontalnih i vertikalnih bunara. Struzina et al. (2011) prikazuju laboratorijska i terenska istraživanja vezana za primenu horizontalnih bunara, a kao zaključak ističu prednosti horizontalnih bunara u odnosu na vertikalne bunare, navodeći da su ekonomičniji za izradu, da se lakše dolazi do „isušivanja“ vodonosnih slojeva i da se ne moraju uklanjati tokom napredovanja rudarskih radova, pošto se postavljaju na najnižim kotama etaža. Eichler & Drebenstedt (2014), takođe prikazuju inovativna rešenja i

efikasnost odvodjavanja površinskih kopova horizontalnim bunarima koja se primenjuju u Nemačkoj.

Bunari se mogu postaviti oko površinskog kopa, tj. oko dela površinskog kopa na kom se izvode rudarski radovi, te na taj način stvaraju unutrašnju barijeru. Sistem sačinjen od drenažnih bunara funkcioniše na principu interferencije depresionih levaka svakog bunara pojedinačno, shodno tome, kada su drenažni bunari postavljeni u nizu jedan pored drugog, uspevaju da proizvode pomenuti efekat, pa je sniženje nivoa podzemnih voda prilično efikasno (Morton & van Mekerck, 1993). Ukoliko se postavi bunar u funkciju barijere, dobija se uloga slična vodonepropusnim ekranima (Pavlović et al., 2012). S obzirom na pomenuto, bunari dobijaju prednost, pošto su ekrani pasivni elementi i služe za sprečavanje filtracije podzemnih voda, uglavnom sa obodnih strana radne etaže, a pored toga, u sistemu odbrane od podzemnih voda uvek idu sa još nekim objektom za odbranu kojim se obara nivo u zoni površinskog kopa.

Delovi bunara koji imaju funkciju da u kontaktu sa poroznom sredinom omogućе propuštanje podzemnih voda, ali i da zadrže čestice iz porozne sredine su **bunarski filteri**. Simić & Kecojević (1997b) prikazuju osnovne zahteve koje filteri treba da ispunjavaju, dok Milanović et al. (2012) analiziraju ekološke filtere za drenažne bunare koji se koriste za odbranu od podzemnih voda na kolubarskom ugljenosnom basenu u Srbiji. Sumirano, najbitniji zahtevi su sledeći: moraju da omogućе brz i slobodan prolaz vode kroz njih, zatim da spreče nekontrolisano isticanje čestica porozne sredine i prolazak granuliranog bunarskog zasipa u bunar, pruže minimalne otpore kretanju podzemnih voda, omogućе maksimalnu izdašnost bunara, da su jednostavni po konstrukciji, laki za ugradnju, trajni i otporni na hemijsko delovanje podzemnih voda i da budu otporni na spoljne bočne pritiske.

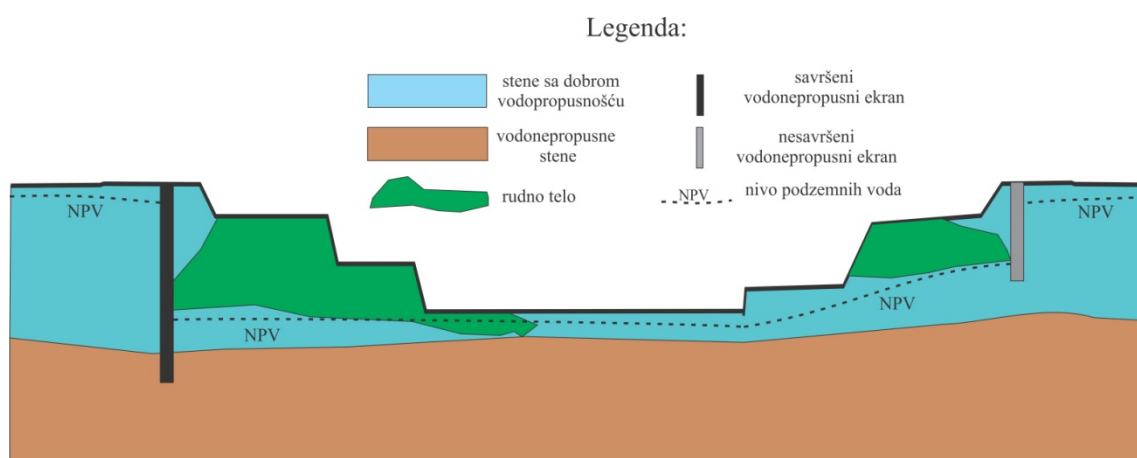
Vodonepropusni ekrani (dijafragme, pregrade, zavese ili baraže) kao elementi sistema za odbranu površinskih kopova upotrebljavaju se za sprečavanje uticaja infiltracionih rečnih voda u slučajevima kada je jasno utvrđena hidraulička veza između izvora priliva površinskih voda i rudnog ležišta (slika II-1.4). Kako domaći, tako i strani autori bavili su se tematikom vodonepropusnih ekrana, njihovim karakteristikama, pozitivnim i

negativnim osobinama prilikom njihove upotrebe za stvaranje barijere i odbrane od priliva podzemnih voda. U odnosu na drenažne bunare, koji predstavljaju osnovni hidrogeološki objekat, ovde je načinjena distinkcija u pogledu izuzimanja prikaza osnovnih karakteristika i detalja tehnologije izrade, ali, sa druge strane, detaljnije su prikazane karakteristike vodonepropusnih ekrana, kao drugi bitan element sistema odbrane od podzemnih voda na površinskom kopu „Buvač“.

Razvijanjem površinskih kopova na većim dubinama (200 m i više) dolazi do toga da oni bivaju ugroženi ne samo vodama u prostoru površinskog kopa, nego i filtriranjem okolnih podzemnih voda u taj prostor (Simić et al, 1984), a shodno pomenutim, predstavljaju lokalni erozioni bazis. Tada se kao jedna od efikasnih metoda za sprečavanje filtracije podzemnih voda u površinske kopove javlja primena vodonepropusnih ekrana. Vodonepropusni ekrani se mogu primeniti kod površinskih kopova gde se „vodonosna serija“ može preseći do vodonepropusne podloge. Kao prednosti ove metode izdvaja se to da je zaštita koja se pruža od filtracije voda pouzdana (Strzodka et al., 1988), zatim da se sigurno sprečava uticaj agresivnih i jako mineralizovanih voda i sniženjem nivoa podzemnih voda u površinskim kopovima se ne izaziva sniženje podzemnih voda u širem regionu, čime se sprečava negativan uticaj depresije na životnu sredinu i razvoj drugih grana privrede (Šubaranović et al., 2013). Nedostaci primene ekrana kod odvodnjavanja površinskih kopova vidni su u tome što iziskuje posebne uslove koji diktiraju njihovu mogućnost izgradnje, kao što su npr. manje dubine (100 m) ili postojanje vodonepropusnog sloja.

Kod izbora elemenata sistema za odbranu od podzemnih voda najčešća alternativa vodonepropusnim ekranima su bunari (Pavlović et al, 2012). Tom prilikom se prednost vodonepropusnih ekrana ogleda u činjenici da je njihova upotreba trajna, ekološki opravdana, pošto ne zahtevaju održavanje i ne troše električnu energiju. S druge strane, nedostatak je vidan u tome što se kod primene ekrana u sistemu odbrane od podzemnih voda moraju dodati još neki objekti unutar zone koja se brani, a to su najčešće bunari koji vrše obaranje nivoa podzemnih voda. Takođe, vodonepropusni ekrani zahtevaju specijalnu tehnologiju i mehanizaciju koja omogućava njihovu izradu, a samim tim i velika početna ulaganja, što nije u tolikoj meri neophodno kod bunara.

Ekrani se prema hidrogeološkim karakteristikama sredine u kojoj se javljaju mogu podeliti na savršene i nesavršene. Takav primer vodonepropusnog ekrana za odbranu od podzemnih voda na površinskom kopu prikazan je na slici II-1.4. Zatim, prema vrsti ispune koja obavlja funkciju sprečavanja protoka podzemnih voda, ekrani mogu biti u vidu glinene zavese, glineno-cementne zavese, zavese od plastične folije i zavese od plastične ispune. Što se tiče tehnologiji izrade, oni se mogu razvrstati na ekrane sa usecima, ekrane sa rovom, ekrane sačinjeni od linije (niza) bunara ili pak činiti kombinaciju pomenutih.



Slika II-1.4: Vodonepropusni ekran kao element sistema odbrane od podzemnih voda

Najstarija metoda izrade vodonepropusnih ekrana predstavlja niz bušotina kroz koje se utiskuje beton. Dubine ekrana po ovoj metodi zavise od mogućnosti dubine bušenja, dok se sam metod ogleda u izradnji bušotine jedna do druge, gde se uporedo svaka druga buši, tj. zapunjuje cementom, a zatim se buše one između, pa se tako dobija vodonepropusna zavesa (Simić et al., 1984).

Pavlović et al. (2012) navode nekoliko vrsta vodonepropusnih ekrana, a to su: glinene zavese, vodonepropusne zavese od plastike i glineno-cementne zavese. Glinene zavese se koriste kod plićih vodonosnih horizonata sa karakterističnim intenzivnim prilivom voda. Izrađuju se u useku do vodonepropusnih naslaga, a zapuna je sačinjena od gline koja se ugrađuje u prirodnom stanju, ili u nekim slučajevima u koloidnom stanju, nabijanjem u zonama do 50 cm. Njena vrednost koeficijenta filtracije treba da bude

manja od 1×10^{-8} m/s. Vodonepropusne zavese od plastike takođe se koriste kod plićih vodonosnih horizonata, uglavnom do oko 25 m, uzimajući u obzir tehničke i ekonomske faktore. Tehnologija izrade se zasniva na izradi useka, zatim postavljanju plastične zavese debljine 1-2 mm na bočnu stranu useka u pravcu strujanja voda, i to tako da pritisak vode pomaže prijanjanju zavese uz tlo, a na kraju pokrivanjem zavese iskopanim materijalom u zonama od 30-50 cm sa nabijanjem. Kod veoma jakog priliva podzemnih voda i na mestima intenzivnog prihranjivanja, zatim i za veće dubine, postavljaju se glineno - cementne zavese. Zavesu su prosečne širine od 50-90 cm i ugrađuje se do vodonepropusnih stenskih mase sa usecanjem do 50 cm. Mogu biti savršene i nesavršene, u zavisnosti da li je presečena cela debljina izdani. Ugrađuju se u zonama od po 10-ak metara u usek pod stalnim nivoom isplake, a prostor se popunjava glineno-cementnom smesom karakterističnog koeficijenta filtracije manjeg od 1×10^{-8} m/s.

Libicki (1985) navodi da vodonepropusni ekrani predstavljaju jednu od najboljih mera odbrane površinskog kopa od dinamičkih rezervi podzemnih voda. U tom pogledu najjednostavniji su kopani ekrani, koji nastaju tako što se napravi rov, da zidovi budu sigurni od rušenja, a potom se i dopune tiksotropnom „plombirajućom“ supstancom (eng. sealing). Ovakvi ekrani imaju nedostatak, jer su ograničeni dubinom, koja je uslovljena karakteristikom bagera. Drugi tip ekrana radi se bušenjem bušotina i injektiranjem tečne „plombirajuće“ supstance pod pritiskom koja posle određenog vremena postaje čvrsta, pa se tim putem stvara barijera. Ovakvi ekrani imaju veliku prednost, jer mogu da se izrade i na dubinama od nekoliko stotina metara, a nedostaci se ogledaju u komplikovanosti i neizvesnosti hidrogeoloških uslova sredine kroz koju se izvode bušotine. Sa ekonomskog stanovišta, upotreba vodonepropusnih ekrana predstavlja dosta skuplju metodu u odnosu na ostale, i to u domenu izrade, ali valja napomenuti da smanjuje troškove kod kontinualnog crpenja i odvođenja voda tokom rudarskih radova, pošto sprečavaju doticaj voda.

Ilić et al. (2006a) daju pregled i analizu dosadašnjih tehnologija izrade vodonepropusnih ekrana koje su korišćene za potrebe odbrane površinskih kopova uglja (kostolački, kolubarski i kosovski ugljenosni baseni) od podzemnih voda u Srbiji. Navodi se kako je najuspešniji način presecanja toka podzemnih voda do površinskog kopa izrada

vodonepropusnih ekrana, pošto pružaju pouzdanu zaštitu od podzemnih voda i smanjuju negativan uticaj depresije. Metode i tehnologija izrade vodonepropusnih ekrana koje se primenjuju su sledeće:

- metoda izrade „zamenom mase“ koja se sastoji u tome da se osnovnom rudarskom mehanizacijom (najčešće dreglajnama i bagerima sa obrnutom kašikom) vrši otkopavanje vodopropusnog sloja u vidu useka sve do vodonepropusne podine, pa se zatim buldožerima u otkopani usek ubacuje glinoviti materijal, a po tome je i dobila naziv, jer se umesto otkopane vodopropusne mase u usek ubacuje glinoviti materijal;
- druga metoda je izrada ekrana sa usekom i zapunom, koja obuhvata izradu uskog i dubokog useka koji se posle toga zapunjava glino-cementnom ili bentonit-cementnom.

Schöpf (2008) prikazuje primenu vodonepropusnih ekrana kao efikasnu metodu kod sprečavanja horizontalnih priliva podzemnih voda u površinske kopove, navodeći tzv. „trench cutter“ tehnologiju izrade ekrana koja se primenjuje širom sveta tokom poslednjih 20 godina. Kao primere primene pomenute tehnologije navodi izradu vodonepropusnih ekrana u oblasti „Peribonika“ (Kanada), čije su karakteristike 120 m dubina sa debljinom zida od 1,5 m i primenu vodonepropusnih ekrana na tromedi Indije, Nepala i Kine, čije su karakteristike 75 m dubina sa debljinom zida od 0.75 m.

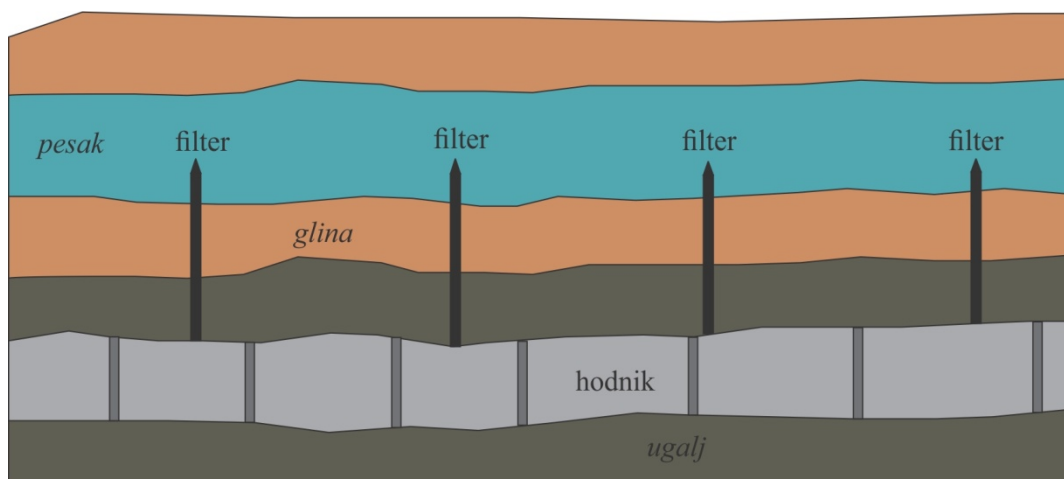
Šubaranović & Polomčić (2006) razmatraju mogućnost, kao i ekonomsku i ekološku opravdanost odbrane površinskog kopa „Drmno“ od podzemnih voda vodonepropusnim ekranom. Razlog njegove upotrebe je proširenje površinskog kopa do krajnjih severnih granica, tj. do reke Dunav. Analizirano je nekoliko varijanti za izbor lokacije vodonepropusnog ekrana, njihova tehnologije izrade i efekta odbrane u odnosu na zaštitu životne sredine, dok su Ilić et al. (2006b) prikazali i dopunska geološka istraživanja koja se vrše za te potrebe, a to su geofizički karotaž i geomehanička ispitivanja. Takođe, Polomčić & Šubaranović (2006) prikazuju proveru modela vodonepropusnih ekrana koji se koriste za odbranu od podzemnih voda pored drenažnih bunara na površinskom kopu „Drmno“. Zaključak koji je naveden prilikom analize je da primena

vodonepropusnog ekrana smanjuje količinu podzemnih voda koje treba da se iscrpe drenažnim bunarima za 111 l/s za vreme prognoznog perioda ili, drugačije rečeno, njegova primena u odnosu na sistem odbrane sačinjen samo od drenažnih bunara smanjuje količinu podzemnih voda godišnje za $3,5 \times 10^9 \text{ m}^3$. Naposljetku, Pavlović & Šubaranović (2007) daju tehno-ekonomsku analizu vodonepropusnih ekrana na prostoru površinskog kopa „Drmno“.

Kao objekti za odbranu od podzemnih voda na površinskim kopovima u čvrstim stenama koriste se **okna** sa funkcijom sniženja nivoa podzemnih voda i za smeštaj cevi za transport vode iz kopa (Simić et al., 1984).

Iglofilteri predstavljaju metalnu cev prečnika uglavnom od 50-100 mm i dužine 10-20 m, sa filterom postavljanim u donjem delu i vakuum pumpom povezanom sa gornjim delom (Pavlović et al., 2012). Prvu primenu su našli kod obaranja nivoa podzemnih voda u građevinarstvu za potrebe izrade temeljnih jama. U drugoj polovini XX veka su pronašli i primenu na površinskim kopovima, predstavivši ih kao pomoćne elemente sistema odbrane od podzemnih voda. Iglofilteri se koriste za odvodnjavanje peskovitih, glinovitih i prašinastih sočiva koji se teško odvodnjavaju drugim objektima, kao i za zaštitu kosina etaža od pojave kliženja.

Kao podzemni objekti za odbranu površinskih kopova od podzemnih voda koriste se **horizontalne drenažne prostorije - hodnici** (slika II-1.5). Iako se retko upotrebljavaju kod površinskih kopova, zbog skupe izrade i troškova održavanja, ipak se mogu koristiti samostalno ili kao prihvatni objekti za **usadne** (slika II-1.5), **vakuum** i **sprovodne filtere**. Ovi filteri predstavljaju perforirane cevi i koriste se za odvodnjavanje podine i povlate podzemnih prostorija za manje količine podzemnih voda (Pavlović et al, 2012).



Slika II-1.5: Postavljanje usadnog filtera iz hodnika

Zaštitni nasipi se koriste za već pomenutu zaštitu i stabilizaciju kosina na površinskim kopovima (kod horizontalnih bušotina), ali takođe kako bi pospešili odvođenje voda sa etažnih kosina, u cilju sprečavanja direktnog isticanja i deformacije kosina (Simić et al., 1984). Zaštitini nasipi se grade od krupnozrnog peska i šljunka. Ako se postavljaju na kosinama etaža koje su ugrožene podzemnim vodama, tada se postiže kontrolisano isticanje podzemnih voda i iznošenja sitnih čestica iz sredine.

Odlagališta, koja su sastavni delovi površinskih kopova, takođe moraju biti zaštićena. Kao objekte za odbranu od podzemnih voda koriste se slični objekti kao i kod odbrane kod površinskih kopova. Pored toga, izdvajaju se još neki koji su dalje navedeni. Ukopane **drenažne cevi** su vrsta drenažnih objekata koji se koriste na površinskim kopovima za odbranu odlagališta i kosina etaža koje su izgrađene od delimično vodopropusnih naslaga. Kod zaštite odlagališta drenažna cev se postavlja u podinskom delu koji sadrži podzemne vode i na taj način se one veoma efikasno mogu drenirati. Još neki objekti koji se mogu koristiti su **rovovi**, **horizontalne drenaže**, **horizontalni drenovi** (perforirane cevi) i ređe **hodnici** (Pavlović et al, 2012). Bunari se kao drenažni objekti ne mogu koristiti kod odlagališta zbog heterogene sredine.

Libicki (1985) je prikazao preporuke i predloge za izbor elemenata sistema odbrane od podzemnih voda, na osnovu svog dugogodišnjeg rada i iskustva koji obuhvata preko

100 površinskih kopova na kojima se eksploatišu različite rude. Pritom je predstavio njihove prednosti i nedostatke za različite hidrogeološke uslove. Kod ležišta koga čine čvrste stenske mase sa pukotinskim tipom poroznosti često se odbrana vrši izradom šahtova na najnižim kotama površinskog kopa u koje se postavljaju pumpe. Ređe se koriste bunari sa potapajućim pumpama i horizontalne drenaže. Kod aluvijalnih izdani velikih debljina i koeficijenta filtracije većeg od 10^{-5} m/s, gde izdani mogu biti i hidraulički povezane sa površinskim tokovima, preporučuje se sistem odvodnjavanja koji se sastoji od niza bunara sa dodatnim objektima - kanalima i pumpnim stanicama. Kombinacija kanala i pumpnih stanica se koristi isključivo ako je visoka stabilnost zidova etaža. Kod postojanja privilegovanih pravaca strujanja podzemnih voda, kao što su zone visoke vodopropustljivosti i zone površinskih kopova koje se nalaze u blizini površinskih voda (reke, jezera) preporučuju se vodonepropusni ekrani.

1.5. Faktori i kriterijumi za izbor elemenata sistema za odbranu od podzemnih voda

Odbrana od podzemnih voda je neophodna kod svih terena čiji se radovi vrše ispod kote nivoa podzemnih voda, pa tako i eksploatacije ležišta mineralnih sirovina, jer se voda sliva direktno ka njima i teži ka ponovnom uspostavljanju prvobitnog režima podzemnih voda (Brassington, 2007). Tako podzemne vode imaju štetan uticaj na stabilnost kosina etaža, utičući na povećanje sadržaja vlage kod stenskih masa i povećanje pritisaka što dovodi do problema deformacija tla, a samim tim i prekida rudarskih radova.

Da bi se rudarski radovi neometano odvijali, potrebno je ostvariti osnovne ciljeve (Kecojević, 2003), kao što su sledeći: radna sredina treba da bude suva, stabilna i bezbedna, a hidrostatički pritisak treba da se snizi kako bi se očuvala stabilnost kosina etaža. Ovo je u nekoj meri lakše ili teže postići u zavisnosti od hidrogeoloških karakteristika stenskih masa, dubine iskopa kod rudarskih radova u odnosu na nivo podzemnih voda i čvrstoće stena koju čine kosine etaže.

Predloženi kriterijumi za izbor elemenata sistema odbrane od podzemnih voda koje navodi Libicki (1985) su sledeći:

- hidrogeološki uslovi na istražnom području,
- tehnologija rudarskih operacija,
- dosadašnja iskustva sa metodama odbrane od podzemnih voda i sistemima odbrane od podzemnih voda,
- zaštita životne sredine i zaštita na radu,
- analiza ekonomskih troškova: investicioni i operativni troškovi

Unapred definisana dinamika rudarskih radova posebno utiče na izbor elemenata sistema za odbranu od podzemnih voda. Samim tim, dinamika izrade i dinamika uključenja i isključenja pojedinih elemenata sistema odbrane prati napredovanje rudarskih radova, čime se usklađuju ta dva procesa. Treba napomenuti i da se većina elemenata sistema odbrane od podzemnih voda izrađuje za relativno kratko vreme, a isto tako se i njegovi pojedini elementi isključuju iz funkcije.

Stečeno iskustvo sa sistemima odbrane od podzemnih voda se postavlja kao suštinski kriterijum. Poređenjem karakteristika i rada sistema za odbranu od podzemnih voda na nekom istražnom terenu, može dosta olakšati izbor karakteristika i elemenata sistema odbrane, što je u ovom slučaju površinski kop sa površinskim kopom sličnih hidrogeoloških karakteristika. Na osnovu toga, prikazani su neki primeri sa površinskih kopova sa prostora Srbije.

Stevanović et al. (2011) prikazuju rešenje odbrane površinskog kopa „Polje E“ kolubarskog basena od površinskih i podzemnih voda, a prikazano je i izmeštanje korita reke Peštan sa prostora ležišta uglja. Počev od prvih rudarskih radova, deo reke Peštan se izmešta u obodni kanal koji služi i za prihvatanje voda od odvodnjavanja ovog kopa. Površinske vode koje direktno padaju u radno područje, etažnim kanalima usmeravaju se prema vodosabirnicima i pomoću pumpnih agregata ispumpavaju istaloženu vodu van branjenog područja. Odbrana od podzemnih voda takozvane „međuslojne“ izdani vrši se sistemom sačinjenog od drenažnih bunara. Ukupan broj bunara je 21 sa

međusobnim rastojanjem od 100 do 200 m, raspoređenih u linije, sa rastojanjem od 350 do 500 m. Drugi deo sistema čini 6 drenažnih bunara i koriste se za odbranu od podzemnih voda iz podinske izdani. Prognoza je data za period od 7 godina (2011-2017).

Šubaranović et al. (2011) prikazuju hidrodinamički proračune za potrebe dimenzionisanja broja bunara, njihovog međusobnog rastojanja i pojedinačnih kapaciteta, kao i za prognozu efekata rada sistema odbrane od podzemnih voda koji su realizovani na hidrodinamičkom modelu režima podzemnih voda zone ležišta uglja Drmno. U sprovedenoj hidrodinamičkoj analizi odbrane kopa od podzemnih voda obrađene su dve varijante: varijanta bez vodonepropusnog ekrana i varijanta sa vodonepropusnim ekranom na „Deonici 1“. Za prognozni period od godinu dana, postojanje vodonepropusnog ekrana uticalo je na opadanje proticaja drenažnih bunara za 151 l/s, a za drugu varijantu, priliv voda u površinski kop je oko 2 l/s.

Buhač et al. (2012) prikazuju rešenje odbrane površinskog kopa „Južno Polje“ od površinskih i podzemnih voda i regulaciju reka na površinskom kopu „Južno Polje“ kolubarskog basena. Oni navode dve faze odbrane od voda, a to su: „prethodno odvodnjavanje“, koje podrazumeva izmeštanje vodotoka i regulaciju reke Kolubare, odbranu kopa od atmosferskih voda koje gravitiraju ka kopu i odbranu od podzemnih voda, dok druga faza, označena kao „eksploataciono odvodnjavanje“, podrazumeva odbranu površinskog kopa od atmosferskih voda koje padaju u radno područje i odbranu od podzemnih voda. Regulacija reke Kolubare, Peštana i potoka Lukavica podrazumeva njihovo izmeštanje iz konture projektovanog površinskog kopa na sigurnoj udaljenosti od njegovih granica, kako bi se obezbedili uslovi stabilnosti radnih i završnih kosina, ali kako bi se i sprečila infiltracije voda iz rečnih korita.

Milanović et al. (2012) prikazuju jednogodišnju analizu rada linije drenažnih bunara sa svrhom predodvodnjavanja površinskog kopa „Drmno“. Linija se sastoji od 56 bunara i predviđena je da vrši odbranu od podzemnih voda u maksimalnom periodu za 3 godine, prateći na taj način dinamiku napredovanja rudarskih radova.

Polomčić et al. (2012) prikazuju prvu fazu metodologije izbora objekata zaštite od podzemnih voda na površinskom kopu Drmno. Zbog velikog priliva podzemnih voda iz aluvijona reka Dunav i Mlava, izvršena je detaljna hidrodinamička i tehnička analiza mogućnosti zaštite površinskog kopa Drmno u dve varijante. Prva varijanta podrazumeva odbranu kopa od podzemnih voda drenažnim bunarima, a druga varijanta podrazumeva kombinovani sistem odbrane kopa koji se sastoji od vodonepropusnog ekrana i umanjenog broja drenažnih bunarima u odnosu na prvu varijantu. Prikazan je hidrodinamički model ležišta uglja Drmno, a prva faza metodologije obuhvata rekalkulaciju hidrodinamičkog modela ležišta uglja Drmno, hidrodinamički proračun sniženja nivoa podzemnih voda za period 2013-2038. god. i rezultate prognoznih proračuna. Rezultati prognoznih proračuna su pokazali da je rešenje odvodnjavanja sa kombinacijom vodonepropusnog ekrana i linija bunara znatno povoljnije, imajući u vidu posebno i pozitivan efekat u odnosu na zaštitu životne sredine bunarima. Na kraju hidrodinamičke analize zaključeno je da se nešto veće obaranje nivoa podzemnih voda ostvaruje u drugoj varijanti, koja uključuje i drenažne bunare i vodonepropusni ekran. Najveća ulaganja u drugoj varijanti su vidljiva u početnim godinama rada, kada se izrađuje ekran i obodna linija drenažnih bunara, dok su investicioni i eksploatacioni troškovi višestruko niži u odnosu na prvu varijantu.

Dragišić (2005) navodi da je zaštita životne sredine osnovni kriterijum koji se mora ispoštovati pri odabiru karakteristika sistema za odbranu od podzemnih voda, pošto je poznato da kod rudnih ležišta dolazi do niza negativnih pojava koji dovode do procesa degradacije životne sredine. Odvodnjavanje ležišta i okolorudnih stena utiče na strukturu opšteg vodnog bilansa i drastičnih izmena odnosa podzemnih i površinskih voda. Tim putem može se doći do precrpljivanja rezervi podzemnih voda u vodonosnim slojevima, povećanja zone aeracije, a moguće je i isušivanje stenskih masa u zoni depresionog levka, kao i presušivanja izvora, bunara i manjih površinskih tokova i akumulacija.

Libicki (1985) navodi dve stavke koje su vezane za kriterijum životne sredine. Prva stavka je uticaj depresione krive na širu okolinu terena prilikom sniženja nivoa podzemnih voda, bez obzira na to koja metoda odbrane i odvodnjavanja se koristi.

Takođe, moraju se imati u vidu štetni uticaji na zemljište i površinske tokove, kao što je problem isušivanja. Druga stavka je vezana za iscrpljene podzemne vode. Takve rudničke vode su obično specifičnog hemijskog sastava i imaju štetan i agresivan uticaj na okolinu, dok upotreba vodonepropusnih ekrana može da smanji ovakav uticaj. Korišćenjem bunara kao elementa sistema odbrane od podzemnih voda i potapajućih pumpi dobija se „najčistija“ voda, a zagađivanje se najčešće dešava kada takva voda stupi u kontakt sa lako rastvorljivim stenama u samom površinskom kopu.

Zaštita na radu ukazuje na najteže i najopasnije uslove koji se tiču podzemnih objekata za odvodnjavanje, pošto, nasuprot njima, ostali sistemi pružaju mnogo povoljnije uslove.

Napominje se da analiza investicionih i operativnih troškova u mnogim slučajevima predstavlja presudni kriterijum. Uopšteno govoreći, sistemi odbrane od podzemnih voda koji su sačinjeni od vodonepropusnih ekrana i podzemnih objekata za odbranu predstavljaju najskuplje sisteme u pogledu investicionih troškova, dok sistemi sačinjeni od bunara i niza bunara predstavljaju najskuplju varijantu u pogledu operativnih troškova, što se najviše odnosi na količinu potrošnje energije za rad pumpi.

Slične kriterijume navode i Morton & van Mekerck (1993), navodeći da se izbor sistema odbrane od podzemnih voda vrši u poslednjoj fazi hidrogeoloških istraživanja. Osnovne faktore koje treba poznavati i koji omogućuju kvalitetan izbor sistema odbrane od podzemnih voda su dimenzije oblasti koja treba da se odbrani ili „isuši“, kao i vrednost kote do koje je potrebno spustiti nivo podzemnih voda za nesmetane rudarske aktivnosti. Pored toga, Morton & van Mekerck (1993) izdvajaju sledeće najznačajnije faktore koji utiču na izbor karakteristika sistema za odbranu od podzemnih voda na površinskim kopovima:

- hidrogeološki,
- karakteristike stena kroz koje se vrši proces bušenja,
- bilans podzemnih voda,
- pristupačnost izrade objekata za sistem odbrane od podzemnih voda,

- dubina instalacije pumpi,
- projektovana dužina trajanja odvodnjavanja i
- izvođačko iskustvo.

Šubaranović & Jocić (2008) navode da je, pored poznavanja svih prirodnih faktora za izbor karakteristika i kvalitetnog sistema za odbranu površinskog kopa od voda, potrebno i da postoji stalan monitoring rada sistema odvodnjavanja. Upotrebom sistema za nadzor i upravljanje radom kod sistema odbrane drenažnim bunarima na površinskom kopovima omogućena su: uključenja, isključenja, praćenje vremena rada pumpi, protoka i nivoa u određenom vremenskom periodu. Na osnovu datih podataka moguće je kvalitetnije i ekonomičnije projektovati novi sistem ili pak pratiti postojeći sistem za odbranu površinskog kopa od podzemnih voda, što bi za cilj imalo brže i ravnomernije odvodnjavanje sredine.

Zaključno sa navedenim, sistem za odbranu od podzemnih voda i njegovi elementi moraju biti kvalitetno izabrani i, prevashodno, pravilno dimenzionisani, što zahteva multidisciplinarni pristup, posebno znanja i iskustva i hidrogeologa i rudara. Za sigurnost u radu, dobre tehničke karakteristike sistema odbrane od podzemnih voda, ekonomiku procesa njegovog rada i minimalnim lošim uticajem rada sistema odbrane na životnu sredinu, neophodno je obratiti pažnju na sledeće stavke:

- sistem za odbranu od podzemnih voda mora da obezbedi dobre i bezbedne uslove za rad na površinskom kopu (otkop, mehanizacija, transport),
- sistem za odbranu od podzemnih voda mora da obezbedi odbranu od podzemnih voda iz svih utvrđenih izdani,
- sistem treba da bude racionalan po pitanju tehničkih, ekonomskih i inženjerskih rešenja,
- sistem za odbranu od podzemnih voda mora da bude zasnovan i projektovan na detaljnim hidrogeološkim istraživanjima, a takođe i geomehaničkim i rudarsko-tehnološkim,
- sistem mora biti usklađen u pogledu odvođenja voda i da nema štetan uticaj na životnu sredinu,

- sistem mora da omogući lak prelaz iz faze otvaranja i faze razrade u fazu eksploatacije rude,
- sistem mora da bude prilagođen izmenama broja objekata za odbranu,
- oprema koja će se upotrebljavati u objektu treba da je u skladu sa tehničko-tehnološkim zahtevima objekta,
- osmatranje objekta sistema treba da se vrši stalno i da se sistematski obavlja u toku čitavog perioda izrade i njegove upotrebe,
- iskustva o funkcionalnosti objekta sistema za odvođenje voda moraju se koristiti u cilju njegove dalje racionalizacije, i na kraju, posebno istaknuto
- sistem za odbranu od podzemnih voda mora da bude usaglašen po dinamici rada i razvoja rudarskih radova.

Uzevši u obzir navedeno, mogu se izvršiti prognozni proračuni u hidrodinamičkom modelu i projektovati varijante sistema odbrane od podzemnih voda.

2. Hidrodinamička analiza režima podzemnih voda

Hidrodinamička analiza predstavlja skup različitih metoda hidrodinamičkih proračuna, od kojih je danas najkompleksnija i najprimenljivija metoda trodimenzionalnog hidrodinamičkog modeliranja režima izdani, bazirana na numeričkom rešavanju diferencijalnih jednačina koje opisuju kretanje podzemnih voda i procese koji se dešavaju u poroznoj sredini. Glavnu primenu u hidrogeologiji nalazi za potrebe analize režima i kvantifikacije bilansa podzemnih voda, analize strujne slike, varijantnih proračuna određenog tehničkog rešenja, kao i za prognozu kretanja podzemnih voda, zagađujuće materije ili toplote.

Primena različitih modela u hidrogeološkoj praksi predstavlja sredstvo kojim se približno predstavlja porozna sredina. Osnovna funkcija svih modela je verifikacija podataka dobijenih istražnim radovima, kao i simulacija i prognoza efekata procesa koji su analizirani. Pored, najprimenljivijeg danas, trodimenzionalnog hidrodinamičkog modela koji se koristi u hidrogeologiji, prikazane su i druge vrste modela koje su se koristile ili se u manjoj ili većoj meri i dalje upotrebljavaju (Polomčić, 2001).

Osnovne modele u hidrogeologiji predstavljaju sledeće vrste modela:

- fizički modeli ili modeli objekata, koji predstavljaju proporcionalno umanjen trodimenzionalni prikaz istražnog područja,
- analogni modeli, kojima se opisuje strujanje podzemnih voda pomoću diferencijalnih jednačina koje opisuju taj strujni tok, zbog čega imaju sinonim modeli elektrohidrodinamičke analogije,
- hibridni modeli, koji su nastali kombinovanjem predhodno navedenih modela i primene kompjutera i
- numerički ili matematički modeli, koji predstavljaju skup matematičkih jednačina kojima se opisuju analizirani procesi u poroznoj sredini.

Prema koncepciji modeliranja postoje i sledeće vrste modela:

- deterministički modeli, koji predstavljaju modele sa fiksnim ulaznim podacima,
- stohastički modeli, okarakterisani mogućnošću simulacije i prognoze određenih procesa tokom vremena, ali bez analize uslova u poroznoj sredini i
- statistički ili probabilistički modeli, koji kao osnovu koriste slučajne veličine pri čemu je glavni pokazatelj neke pojave verovatnoća.

Prema načinu primene u hidrodinamici modeli se mogu podeliti još i na:

- simulacione modele, preko kojih se simuliraju određena fizička stanja i procesi pri kretanju podzemnih voda, a prema nameni mogu biti:
 - modeli za identifikaciju parametara hidrogeološke sredine, tj. modeli čija je osnovna funkcija određivanje hidrogeoloških i hidrodinamičkih parametara,
 - modeli za procenu upravljačkih odluka koji se koriste kada je već formiran neki sistem i njime se simuliraju određenje mere, tj. postupci u upravljanju sistemom iz kojeg se izvode zaključci o efektima tih mera na sam sistem i poroznu sredinu i
 - prognozni modeli koji se koriste za prognozu razvoja nekog procesa u hidrogeološkoj sredini za odgovarajući prognozni period. Prema nameni prepoznajemo sledeće vrste prognoznih modela:
 - hidrodinamički modeli za analizu režima izdani - modeli kojima se na osnovu geometrije i filtracionih karakteristika porozne sredine, graničnih i početnih uslova proračunavaju rasporedi pijezometarskih nivoa na istražnom području, smer kretanja izdanskih voda, proticaji, vrednosti komponente brzine filtracije i kvantitativni elementi bilansa izdani,

- hidrodinamički modeli transporta materije u poroznoj sredini koji se koriste za prognozu i ocenu mogućih smerova i brzine kretanja i koncentracije izučavane materije u izdanskim vodama,
 - hidrodinamički modeli za analizu prenosa toplote koji se koriste pri prognozi smera kretanja termalnih voda i rasporeda toplote u hidrogeotermalnim sistemima, kao i pri prognozi efekata eksploatacije voda iz ovih sistema i
 - hidrodinamički modeli za analizu sleganja ili deformacije tla koji simuliraju i prognoziraju procese koji uzrokuju sleganje i deformacije tla pod dejstvom kolebanja nivoa izdanskih voda;
- optimizacione modele, kojima se određuju optimalna rešenja u odnosu na postavljene kriterijume za izbor jednog od više ponuđenih tehničkih rešenja.

Hidrodinamički modeli se dele i prema numeričkom konceptu rešenja parcijalnih diferencijalnih jednačina strujanja podzemnih voda na:

- modele konačnih razlika,
- modele konačnih elemenata,
- modele graničnih elemenata,
- modele konačnih zapremina,
- modele karakteristika i
- mešovite modele.

Posle prikaza osnovnih modela u hidrogeologiji, opisan je i pristup koji je danas najsavremeniji u hidrodinamičkoj analizi, a to je trodimenzionalni hidrodinamički model, koji je korišćen za prikaz prognoznih proračuna na istražnom području, površinskom kopu „Buvač“. Njegovo kreiranje obuhvata nekoliko faza, a krenuvši redom to su:

- razmatranje problema koji treba rešiti primenom modela, što predstavlja svrhu i cilj modeliranja,

- kreiranje hidrogeološkog modela,
- kreiranje hidrodinamičkog modela ili faza prevođenja hidrogeološkog modela u hidrodinamički model:
 - odabir numeričke metode i softvera za modeliranje,
 - diskretizacija prostora i „uvoz geometrije modela“,
 - „uvoz“ hidrogeoloških parametara porozne sredine,
 - postavljanje graničnih uslova na modelu,
 - postavljanje početnih uslova na modelu,
 - odabir i diskretizacija proračunskog intervala,
- etaloniranje hidrodinamičkog modela,
- analiza osetljivosti hidrodinamičkog modela,
- verifikacija hidrodinamičkog modela,
- izrada različitih prognoznih hidrodinamičkih proračuna - „eksploatacija“ modela i odabir optimalne varijante,
- noveliranje ili rekalkibracija hidrodinamičkog modela i
- prikaz dobijenih rezultata.

2.1. Rešavanje hidrogeoloških problema primenom hidrodinamičke analize

Problemi u hidrogeologiji koji se mogu uspešno rešavati primenom hidrodinamičkog modela mogu biti različiti. U osnovi se ovi modeli mogu koristiti za prognoze kretanja podzemnih voda, za prognozu kretanja zagađujuće materije ili transfer toplote. Još neke primene hidrodinamičkog modeliranja se pronalaze u sledećim slučajevima:

- kod prikaza hidrodinamičkog aspekta hidrogeoloških istraživanja (Polomčić et al., 2011; Hajdin et al., 2012; Đurić et al., 2012; Polomčić et al., 2013c; Polomčić & Bajić, 2014);
- kod vodosnabdevanja, uspostavljanja optimalnog korišćenja i održivog upravljanja podzemnih voda (Polomčić et al., 2005; Kumar, 2006; Mylopoulosa et al., 2007; Polomčić et al., 2011b; Polomčić et al., 2013d; Stauder et al., 2012; Boskidisa et al., 2012; Polomčić et al., 2014e);

- kod određivanja uticaja raznih faktora na izvorišta podzemnih voda i pratećih procesa tokom rada izvorišta, a zatim i uticaja rada izvorišta na okolinu (Frind et al., 2006; Majkić-Dursun et al., 2012; Polomčić et al., 2013a, Polomčić et al., 2014a);
- kod zaštite izvorišta podzemnih voda i određivanja zona sanitarnih zaštita (Moutsopoulos et al., 2008; Dimkić et al., 2013; Polomčić et al., 2013e);
- kod prognoze efekata rada izvorišta podzemnih voda za dugogodišnji period (Polomčić et al., 2014a) i
- kod modeliranje transporta zagađujuće materije (Warner et al., 2009; Yidana, 2011).

Pre početka izrade i „eksploatacije“ hidrodinamičkog modela neophodno je imati precizno postavljen problem, tj. zadatak koji treba rešiti, što ujedno predstavlja cilj ili svrhu izrade modela.

Osnovni ciljevi kod hidrodinamičkog modela površinskog kopa „Buvač“ su varijantni proračuni za potrebe projektovanja sistema odbrane od podzemnih voda, tj. obaranje nivoa podzemnih voda ispod kote rudarskih radova, a zatim i analiza efekata hidrodinamičkih varijantnih proračuna rada sistema odbrane od podzemnih voda, kao i razlika između varijantnih rešenja.

Takav hidrodinamički model kod projektovanja varijanti sistema za odbranu podzemnih voda, sa inženjerske strane i gledišta menadžmenta podzemnih voda, definiše se kao skup više matematičkih i fizičkih zasnovanih činjenica koje doprinose razumevanje procesa u radu sistema za odbranu od podzemnih voda.

Podzemne vode negativno utiču na eksploataciju ruda i ostale rudarske radove, pa se mora vršiti odbrana od njih. Samim procesima eksploatacije rude i radom sistema za odbranu od podzemnih voda remeti se i prirodna životna sredina, a uticaji podzemnih voda se moraju kvantifikovati kako pre, tako i tokom životnog veka kopa, pa se tim putem obezbeđuje održivost hidrodinamičkih modela. Kao primer može se navesti da proces odbrane od podzemnih voda utiče na oblik krive depresionog levka, u smislu

smanjenja nivoa podzemnih voda u izdani izdani, ili čak i isušivanje okolnih površinskih tokova, izvora ili bunara za vodosnabdevanje. Izrada hidrodinamičkih modela režima izdani područja površinskih kopova omogućuje sagledavanje bilansa tih voda i određivanje međusobnog uticaja podzemnih voda i rudarskih radova. Pored toga, nabrojane su još neke osnovne namene hidrodinamičkih modela kod hidrogeologije ležišta mineralnih sirovina i prikazana je njihova primena kroz najzanimljivije primere iz Srbije i sveta:

- sagledavanje hidrogeološkog sistema rudnog ležišta, kretanja podzemnih voda i opis procesa koji utiču na hidrogeološki sistem rudnog ležišta (Dimitrakopoulos et al., 2000; Rapantova et al., 2007; Bajić & Polomčić, 2012; Kamkar-Rouhani, 2008; Rühaak et al., 2009; Niedbalska et al., 2011; Wels et al., 2012; Brown & Trott, 2014),
- postavljanje prognoza (prognoznih varijantnih proračuna) odbrane ležišta mineralnih sirovina od podzemnih voda (Szczepinski, 2000; Aryafar et al., 2008; Breckenridge & Luszcz, 2011; Agartan & Yazicigil, 2012; Polomčić et al., 2013b; Polomčić et al., 2014b; Polomčić & Bajić, 2015),
- određivanje bilansa podzemnih voda rudnog ležišta i doticaja podzemnih voda u rudarske radove (Brawner 1982, Rapantova & Grmela, 2000; Polomčić et al., 2012; Zaidel et al., 2010; Ogola, 2011; Bajić et al., 2013),
- projektovanje i optimizacija sistema odbrane od podzemnih voda (Jansen et al., 1998; Struzina et al., 2011; Bahrami et al., 2014; Jiang et al., 2013; Bajić & Polomčić, 2014),
- procena uticaja sniženja podzemnih voda na ostale hidrogeološke objekte i pojave u neposrednoj okolini i procena rizika od podzemnih voda (Rubio et al., 2009; Booth & Greer, 2011),
- uticaj sniženja nivoa podzemnih voda na životnu sredinu (Wu et al., 2000; Qiao et al., 2011),
- predviđanja kretanja zagađivača - rudničkih voda (Junfeng et al., 2012),
- prognozu nivoa podzemnih voda posle prestanka rada sistema odbrane i prestanka rada rudnika (Gödeke, 2011) i

- menadžment podzemnih voda (Eckart & Unland, 2000; Salmon, 2003; Waterhouse et al., 2003; Wu et al., 2006; Wu et al., 2010; Brown et al., 2012; Foley et al., 2012)

Krešić (2006) navodi glavna pitanja, koja se postavljaju obično na početku kreiranja hidrodinamičkog modela, ali se u nekim slučajevima dešava da se ista pitanja postavljaju i na njegovom završetku, kada se dođe do saznanja da model možda i nije tako dobar, a to su:

- “da li ima dovoljno kvalitetnih podataka da se model napravi?” i
- “da li ima dovoljno informacija da se oceni tačnost modela?”

Zbog navedenog, po završetku preliminarnih analiza postojećih i raspoloživih podataka o istražnom području najčešće se rade dodatna istraživanja, koja treba da obezbede dovoljno kvalitetne podatke za izradu modela. Po njihovoj realizaciji, sintetizuju se svi rezultati prethodnih i novih istraživanja, a u cilju dobijanja potpune slike prirodne sredine sa gledišta rešavanja postavljenog problema. Ovo predstavlja korak ka uspešnom kreiranju hidrogeološkog modela, a zatim i njegovo prevođenje u hidrodinamički model.

2.2. Hidrogeološki model

Hidrogeološki model podrazumeva interpretaciju dinamičkih i fizičkih karakteristika hidrogeološkog sistema (American Society for Testing and Materials, 2014). Polomčić (2001) navodi da je hidrogeološki sistem definisan: ulaznim elementima, karakteristikama sredine, procesima u posmatranoj sredini i izlaznim elementima, pri čemu su ulazni i izlazni elementi međusobno zavisni. Karakteristike hidrogeološkog sistema su njegova geometrija, odnosno prostorni raspored vodonosnih sredina, kao i njihove filtracione karakteristike. Formiranje hidrogeološkog modela predstavlja šematizaciju hidrogeološkog sistema, zbog hidrogeološke i hidrodinamičke složenosti uslova, a to podrazumeva sledeće (Polomčić, 2002):

- šematizaciju oblasti strujanja (geometrije izdani),
- šematizaciju filtracionih karakteristika porozne sredine i hidrodinamičkog stanja izdanskog toka,
- šematizaciju režima izdani na osnovu koje su utvrđuju određene zakonitosti, pojave i raspodele faktora koji utiču na režim izdanskih voda,
- šematizaciju elemenata bilansa izdanskih,
- šematizaciju graničnih uslova hidrogeološkog sistema koji predstavljaju doticaj vode u model i oticaj iz njega i
- šematizaciju početnih uslova koji karakterišu vrednosti pijezometarskih nivoa u nekom početnom vremenu.

Hidrogeološki model predstavlja prvi korak prilikom modeliranja podzemnih voda i prethodi izradi hidrodinamičkog modela, a bez pravilno definisanog hidrogeološkog modela, hidrodinamički model gubi smisao i tačnost. Slično kao i kod već pomenutih faza (poglavlje II-1.2) kod hidrogeoloških istraživanja kod površinskih kopova (Morton & van Mekrek, 1993) i povezivanjem činjenica, hidrogeološki model se može raditi kroz dve faze tzv. „faze konceptualizacije”:

- prva faza predstavlja kreiranje sa svim prikupljenim „dosadašnjim” podacima sa istražnog terena i, kao takav, hidrogeološki model predstavlja bazu u kojoj bi se uvidelo gde su podaci „kritični”;
- druga faza izrade hidrogeološkog modela predstavlja njegovu detaljnu izradu, koja je rezultat dodatnih, novijih geoloških i hidrogeoloških istraživanja, a na ovaj način je urađen i hidrogeološki model površinskog kopa „Buvač” (Bajić & Polomčić, 2008).

Kod hidrogeološkog modela, u osnovi, prikazuje se tip stena, pri čemu se posebno izdvajaju izdani i njihov međusobni odnos i raspored u prostoru, a zatim se mogu još i prikazati nivoi podzemnih voda izdani, pravci strujanja podzemnih voda, tj. prikaz doticaja i oticaja iz hidrogeološkog sistema. Sledeća faza je prevođenje hidrogeološkog modela u hidrodinamički preko geometrije modela, tj. prostornog rasporeda hidrostratigrafskih jedinica, a potom i hidrogeoloških parametara porozne sredine,

postavljanja početnih i graničnih uslova i izbora numeričke metode (Krešić, 2006; Krešić & Mikszewski 2012).

2.3. Trodimenzionalni hidrodinamički model režima podzemnih voda

Pored već prevaziđenih metoda modeliranja, kao što su pomenuti fizički i analogni modeli, savremeni modeli koji se najviše koriste u hidrogeologiji su trodimenzionalni hidrodinamički modeli, kojima se opisuje kretanje podzemnih voda i porozna sredina. Sinonim za hidrodinamički model je matematički model. Hidrodinamički model se kreira tako što se podeli ceo hidrogeološki sistem na određen broj malih trodimenzionalnih „ćelija”, gde se za svaku ćeliju postavi, a zatim i reši parcijalna diferencijalna jednačina strujanja podzemnih voda. Parcijalnim diferencijalnim jednačinama se mogu opisati, pored kretanja podzemnih voda, i ostali fizički procesi koji se dešavaju u poroznoj sredini, što znači da je hidrodinamički model režima podzemnih voda matematički sistem sa „n“ jednačina, gde „n“ odgovara broju ćelija, koje su izvedene iz osnovnih principa fizike, sa isto toliko nepoznatih koje uglavnom predstavljaju pijezometarske nivoe. Sistem jednačina se rešava primenom kompjuterskog softvera i numeričkih metoda, odakle potiče još jedan sinonim za hidrodinamički model, a to je numerički model. Parcijalne diferencijalne jednačine se u tom slučaju zamenjuju konačnim razlikama, konačnim elementima, graničnim elementima ili konačnim zapreminama, pa su u odnosu na primenjenu metodu to tzv. modeli konačnih razlika, modeli konačnih elemenata, modeli graničnih elemenata ili modeli konačnih zapremina.

Pored simulacije kretanja podzemnih voda, kao što je pomenuto, hidrodinamičkim modelom se mogu simulirati i procesi u poroznoj sredini: migracija materija koje se nalaze u podzemnim vodama, fizičko-hemijske reakcije u podzemnim vodama, procesi interakcije podzemnih voda i porozne sredine i procesi izmene toplotne energije.

Hidrodinamički model može biti predstavljen i analitičkim, odnosno partikularnim rešenjima opštih diferencijalnih jednačina kojima se opisuje kretanje podzemnih voda. Kako je istražno područje vezano za površinski kop, zanimljive primere analitičkih

modela predstavili su Hanna et al. (1994), Marinelli & Niccoli (2000), Shevenell (2000) i Li et al. (2014). Međutim, iako su ovakva rešenja nalazila veliku primenu u ranijoj inženjerskoj praksi, ne mogu se primeniti na složenije uslove strujanja zbog postavljenih ograničenja. Danas se primenjuju numeričke metode rešavanja opštih diferencijalnih jednačina kretanja podzemnih voda, koje veoma lako omogućuju proučavanje složenih trodimenzionalnih kretanja podzemnih voda, njihovu simulaciju i prognozu režima.

Osnovne i najvažnije osobine trodimenzionalnih hidrodinamičkih modela su (Polomčić, 2014):

- mogućnost „uvoza“ u model velikog broja podataka o izvedenim hidrogeološkim i hidrodinamičkim istraživanjima,
- mogućnost lakog sprovođenja komplikovanih hidrodinamičkih proračuna,
- mogućnost determinisanja parametara porozne sredine i elemenata bilansa podzemnih voda,
- mogućnost simulacije procesa koji se odvijaju u hidrogeološkom sistemu,
- mogućnost prognoze režima izdani i razvoja pratećih procesa uzrokovanih kretanjem podzemnih voda i
- mogućnost obezbeđenja dovoljno pouzdanih podloga za dobijanje različitih rešenja postavljenog zadatka i njegovu dalju optimizaciju.

Kao glavni zadatak koji se tiče rešavanja problema iz oblasti hidrogeologije izdvaja se prognoza režima podzemnih voda, najčešće u uslovima eksploatacije ili kreiranja tehničkih rešenja, što je slučaj i sa sistemom odbrane od podzemnih voda na površinskom kopu „Buvač“ (Polomčić & Bajić, 2015). U zavisnosti od problema koji treba rešiti primenom hidrodinamičke analize, bitnu ulogu igraju znanja i iskustva eksperta, uslovi na istražnom terenu i tehničke mogućnosti njegovog rešenja.

Zahvaljujući razvitku tehnike i primeni računara, davno postavljene numeričke iterativne metode rešavanja sistema diferencijalnih jednačina doživele su svoju punu ekspanziju. Nihovo rešavanje, prilikom korišćenja hidrodinamičkog modeliranja, može se vršiti primenom dva konceptualno različita pristupa, a to su:

- rešavanje direktnog zadatka i
- rešavanje inverznog zadatka.

Najčešće su oba pristupa zastupljena, s tim što se, uzevši u obzir redosled, inverzni zadatak obično prvi rešava. Pod rešavanjem direktnog zadatka podrazumeva se proces kod koga se za poznate karakteristike izučavanog prirodnog sistema i zadate ulazne parametre, proračunom dobija traženi izlazni parametri. Kod hidrodinamičkog modela parametri sredine su uglavnom geometrija i filtracione karakteristike porozne sredine, dok se kao ulazni parametri zadaju izmereni piježometarski nivoi i proticaji, a kao rezultat ovakvog proračuna dobijaju se, takođe, nivoi i proticaji. Kod rešavanje inverznog zadatka parametri izučavanog sistema su nepoznati i utvrđuju se kroz proračune iterativno. Pri ovim proračunima poznati su ulazni i izlazni parametri, tj. piježometarski nivoi i proticaji. Inverzni zadatak se rešava u fazi izrade i verifikacije matematičkog modela, dok se rešavanje direktnog zadatka vrši u proračunima simulacije i prognoze režima podzemnih voda.

Polomčić (2001) kao osnovne elementi hidrodinamičkog modela navodi karakteristike hidrogeološke sredine, granične i početne uslove i tzv. „matematički aparat“ (softver). Pored geometrije izdani, parametri koji karakterišu hidrogeološki sistem su i još neke fizičke, hidrogeološke i hidrodinamičke veličine, a to su: filtracione karakteristike porozne sredine, režim izdani, elementi bilansa izdani i kvalitativna svojstva podzemnih voda. Kako bi se prirodna sredina sa tim parametrima „uvezla“ u model, potrebno je postaviti odgovarajuće granične i početne uslove i izabrati „matematički aparat“ za rešavanje sistema parcijalnih diferencijalnih jednačina koje opisuju kretanje podzemnih voda i prateće procese.

2.3.1. Prevođenje hidrogeološkog modela u hidrodinamički model

Posle izrade hidrogeološkog modela, kao i na osnovu prikazanih hidrogeoloških karakteristika istražnog područja i izvršene analize karakteristika porozne sredine, vrste kretanja i elemenata režima podzemnih voda, sledi njegova nadogradnja u hidrodinamički model. Priprema ovih podloga i ulaznih podataka predstavlja početak

kreiranja hidrodinamičkog modela, a realizuje se tako što se od brojčanih vrednosti parametara porozne sredine formiraju datoteke koje predstavljaju ulaz za sprovođenje hidrodinamičkih proračuna, dok je obično osnovna alatka u kojoj se pripremaju ulazni podaci program Microsoft Excel.

Još jedna bitna karakteristika predstavlja interpolaciju podataka dobijenih istraživanjem. Ovaj postupak je često potreban zbog osnovnog zahteva modela, što predstavlja potrebu da se sve ćelije “popune” parametrima, bez obzira na činjenicu da raspoloživi terenski podaci nekad daju ograničenu informaciju o parametrima celokupnog hidrogeološkog sistema. Najefikasniji način interpolacije je pomoću nekog od softvera koji daju rezultat u formatu pogodnom za direktni prenos u hidrodinamički model. Pored toga, nedostaci dobijenih rezultata tim putem lako se procenjuju subjektivnom intervencijom eksperta. U slučaju hidrodinamičkog modela “Buvač” za te potrebe korišćena je metoda fazi kriginga (poglavlje II-3.6). Treba naglasiti da neki modelski softveri imaju mogućnost da sami izvrše interpolaciju.

U okviru izrade hidrodinamičkog modela analiziraju se:

- geometrija izdani: vrši se diskretizacija hidrogeološkog modela i stvara se matrica kojom su definisani raspored i dimenzije polja, a takođe se formiraju matrice kota podine i povlate vodonosne sredine,
- filtracione karakteristike porozne sredine: stvaraju se matrice rasporeda koeficijenta filtracije (ranije koeficijenta vodoprovodnosti) i matrice efektivne poroznosti ili specifične izdašnosti izdani,
- parametri vertikalnog bilansa izdani: stvaraju se matrice veličine infiltracije, evapotranspiracije,
- granični uslovi,
- početak i kraj vremenskog perioda za koji se vrši proračun,
- veličina intervala kojim se diskretizuje vreme i
- podaci o izmenama graničnih uslova i parametara vertikalnog bilansa tokom vremena.

Kod trodimenzionalnog hidrodinamičkog modela, zavisno od šematizacije i diskretizacije, primenjuje se odgovarajuća numerička metoda rešavanja diferencijalnih jednačina. Pušić (1994) preporučuje da se u uslovima homogeno raspoređenih podataka primenjuje metode konačnih priraštaja, a da se u uslovima neravnomernog rasporeda i gustine informacija o prirodnoj sredini primenjuje metoda konačnih elemenata.

Što se tiče softvera, pored sistema jednačina kojima se opisuje analizirano strujanje, on uključuje u sebe i numeričke metode njihovog rešavanja, postupak zadavanja ulaznih parametara i izbor i način prikaza dobijenih rezultata (Polomčić, 2001). Najčešće korišćen kôd konačnih razlika je Modflow, koji je razvijen u Geološkoj službi Sjedinjenih Američkih Država (Mc Donald & Harbaugh, 1988), a tokom vremena se usavršava i razvija (Polomčić et al., 2014d). Kôd Modflow pripada grupi "blok-centričnih" modela, zato što se izračunati pijezometrijski nivo odnosi na centar svake modelske ćelije. Za kôd Modflow postoji više grafičkih interfejsa za sprovođenje hidrodinamičkih proračuna, a među najviše korišćenim nalaze se: „Groundwater Vistas” (Rumbaugh & Rumbaugh, 2007), „Visual Modflow” (Waterloo Hydrogeologic), „Processing Modflow” (Chiang & Kinzelbach, 2001; Chiang, 2005), „Modflow Surfact” (HydroGeoLogic) i „GMS - Groundwater Modeling System” (Aquaveo). Hidrodinamički model režima podzemnih voda površinskog kopa „Buvač” urađen je korišćenjem grafičkog interfejsa Visual Modflow, verzija 4.2, dok je njegovo inoviranje urađeno korišćenjem grafičkog interfejsa Groundwater Vistas, verzija 6.31 (Rumbaugh & Rumbaugh, 2011).

Posle izbora softvera vrše se: „uvoz” geometrijskih karakteristika područja u model, diskretizacija prostora, zadavanje hidrogeoloških parametara porozne sedine, postavljanje graničnih uslova, zadavanje početnih uslova i diskretizacija vremena - proračunskog interval te se tako hidrogeološki model transformiše u hidrodinamički model.

2.3.1.1. Geometrizacija i diskretizacija prostora i vremena

Geometrizacija hidrogeološkog modela se poklapa sa geometrizacijom hidrodinamičkog modela, pa se tim putem prethodno spremljeni fajlovi „uvoze“ u hidrodinamički model.

Diskretizacija prostora izučavanog terena se vrši u cilju izdvajanja celine koje se mogu smatrati homogenim i izotropnim. Oblici ćelija diskretizacije mogu biti različiti, što zavisi i od primenjene numeričke metode, a najčešće su u pitanju oblici paralelograma (kvadrat i pravougaonik) i trougla, posmatrano u planu, a posmatrano u prostoru to su prizme, najčešće četvorostane. Kod metode konačnih razlika oblik ćelije je kvadrat ili pravougaonik. Od veličine ćelije diskretizacije zavise preciznost i reprezentativnost, a samim tim i realnost dobijenih rezultata hidrodinamičkih proračuna. Sitnija diskretizacija će, po pravilu, obezbediti veću preciznost i veću gustinu dobijenih rezultata, ali u nedostatku odgovarajućih podataka sa terena, postavlja se pitanje realnosti preteranog „usitnjavanja“ mreže diskretizacije (Polomčić, 2004).

Diskretizacija vremenskog intervala se izdvaja kao jedan ili više vremenskih preseka za koje se sprovode hidrodinamički proračuni u zavisnosti od raspoloživih podataka, njihovog kvaliteta i rasporeda u vremenu i zahteva postavljenog zadatka. Krešić (2006) preporučuje da se izdvoji stanje režima podzemnih voda koje se može smatrati stacionarnim ili da se u slučaju proračuna u nestacionarnim uslovima izdvoje karakteristični periodi preseka vremena. Od raspoloživih podataka i karakteristika postavljenog zadatka zavisi i veličina vremenskog intervala u proračunskom intervalu kod proračuna nestacionarnog strujanja. Isto pravilo važi za „usitnjavanje“ kao i kod diskretizacije prostora.

2.3.1.2. Granični i početni i uslovi

Granični uslovi predstavljaju uslove na konturama neke oblasti kretanja podzemnih voda tj. predstavljaju proticaj: doticaj i oticaj u model. Razlikuju se granični uslovi sa konstantnim ili promenljivim veličinama, što su u osnovi pijezometarski nivoi ili

proticaji, dok su u prirodi to konture reka ili jezera, zone hranjenja ili dreniranja izdani, hidrotehnički i hidrogeološki objekti ili hidrogeološke pojave. Kao granični uslovi javljaju se infiltracija i evapotranspiracija sa površine terena kod strujanja sa slobodnim nivoom ili doticaj iz dubljih vodonosnih horizonata, kao posledica migracije podzemnih voda kod strujanja pod pritiskom. U stacionarnim uslovima strujanja granični uslovi su nepromenljivi, dok se u nestacionarnim uslovima mogu menjati tokom vremena. Pušić (1994) navodi da definisanje graničnih uslova predstavlja neizvestan proces u nekim slučajevima, a problemi se najčešće javljaju kod utvrđivanja stvarne hidrauličke uloge konture kod analizirane strujne oblasti, te tako kontakt reke čije korito preseca vodonosni sloj, biva hidraulički otežan zbog kolmiranosti dna usled taloženja vučenog i suspendovanog nanosa ili nivo u bunaru ne predstavlja i nivo izdani zbog dopunskih parazitskih hidrauličkih otpora na filtru i u prifiltarskoj zoni.

Da bi se formirala proračunska šema ili model, potrebno je izvršiti šematizaciju graničnih uslova u planu i profilu, takođe, potrebno je uprostiti složene zakone izmene graničnih uslova na njihove odgovarajuće promene po vremenu. Kod rešavanja problema režima izdani postavljaju se sledeći granični uslovi (Bear, 1979):

- granica konstantnog potencijala,
- granica sa zadatim proticajem,
- vodonepropusna granica,
- slobodna vodena površina,
- površina procurivanja,
- polupropusna kontura i
- nagla promena propusnosti porozne sredine.

Granični uslovi, u zavisnosti od položaja u modelu, mogu okruživati prostor obuhvaćen modelom i biti na njegovim spoljašnjim granicama ili se nalaziti unutar modela, kao na primer reka koja teče kroz model ili bunar.

Bear (1979) i Franke et al. (1987) su opisali granične uslove i pritom izdvajaju sledeća tri tipa:

- granični uslov prvog reda (“Dirichlet-ov” gr. uslov),
- granični uslov drugog reda (“Neuman-ov” gr. uslov) i
- granični uslov trećeg reda (“Cauchy-jev” gr. uslov).

U kódu **ModFlow** (Harbaugh et al., 2000) postoje, takođe, tri glavne grupe graničnih uslova, koje se dalje raščlanjuju detaljnije i označuju pokušaj simulacije prethodno navedenih uslova na terenu:

- a) granični uslovi sa zadatom konstantnom vrednošću pijezometarskog nivoa,
- b) granični uslovi sa zadatom vrednošću proticajem (doticaja/oticaja) i
- c) granični uslovi sa zadatim proticajem (doticajem/oticajem) koji zavisi od pijezometarskog nivoa.

a) Granični uslovi sa zadatom konstantnom vrednošću pijezometarskog nivoa se koriste za simulaciju pijezometarskog nivoa u ćelijama modela koji se ne menja tokom proračuna, bez obzira na promene koje se dešavaju u vidu doticaja ili oticaja vode iz modela. Njegovo korišćenje nema realno hidrauličko opravdanja, jer takvo stanje ne postoji u prirodi. A ukoliko ne postoji drugi izbor, opravdanje primene graničnog uslova sa zadatom konstantnom vrednošću pijezometarskog nivoa se donekle može naći u sledećim slučajevima:

- primenjuje se u slučajevima gde takva granica predstavlja konstantan izvor prihranjivanja,
- primenjuje se u slučajevima gde se doticaj iz granice u model menja linearno u zavisnosti od razlike između pijezometarskog nivoa na granici i pijezometarskog nivoa u unutrašnjosti modela (npr. ako bunar crpi podzemne vode blizu granice, tada sa većom depresijom u bunaru postaje i veći doticaj podzemnih voda sa granice),
- u stacionarnim uslovima gde je površinski tok šematizovan kao savršeni rov sa konstantnim nivoom - “stalno” jezero ili “stalna” reka,
- u stacionarnim uslovima gde je bunar zadat preko konstantnog nivoa i na modelu se određuje njegov kapacitet bez određivanja parazitskih gubitaka,

- u stacionarnim uslovima gde se granica poklapa sa ekvipotencijalnom linijom koja se ne menja u vremenu i dovoljno je udaljena od tog područja da na taj način ne utiče na kretanje podzemnih voda u posmatranoj zoni i
- u stacionarnim uslovima gde je izveden podmodel iz regionalnog modela i rešenje regionalnog modela se usvaja na svim granicama izvedenog modela.

Granični uslov sa promenljivim zadatim pijezometarskim nivoom je blaža verzija graničnog uslova sa zadatim konstantnim pijezometarskim nivoom. Nivo se može menjati na granici za različite vremenske intervale, što znači da je tokom jednog vremenskog intervala simulacije pijezometarski nivo konstantan (npr. predstavljanje srednjih mesečnih vodostaja u reci tokom godine).

b) Granični uslovi sa zadatom vrednošću proticaja simuliraju zadati proticaj - doticaj u model ili oticaj iz njega na osnovu dobijenih podataka o istražnim hidrogeološkim radovima. Granični uslov sa zadatom vrednošću proticaja ($Q = const$) se može zadavati kao spoljašnji (simulira izvore ili ponore) i kao unutrašnji (simulira bunare). Pozitivna ili negativna vrednost proticaja koji se zadaje ukazuju na smer kretanja vode ka izdani, pa se pozitivnim simulira prihranjivanje izdani, a negativnim dreniranje izdani. Kada je proticaj jednak nuli ($Q = 0$), tada se simulira vodonepropusna ili strujna kontura.

Bunari kao granični uslov koriste se za simuliranje bunara ili doticaja u model za modelsku ćeliju gde se on nalazi, a ukoliko je slučaj da postoji više bunara u istoj ćeliji, svi proticaji se sabere i unosi se samo jedan, dok u slučaju da bunar crpi podzemne vode iz više slojeva, u modelu postoji opcija zadavanja bunarskog filtera za svaki sloj.

Prihranjivanje kao granični uslov se koristi za simulaciju prihranjivanja izdani od atmosferskih padavina i površinskih voda. U modelu se prihranjivanje zadaje kao intenzitet u jedinici dužine po vremenu, a kôd Modflow ga preračunava kao proticaj, i to tako što se množi taj intenzitet i površina ćelije. Zbog prirode uticaja atmosferskih padavina i površinskih voda obično se zadaje u ćelijama plićih slojeva ("prvi" sloj).

Evapotranspiracija kao granični uslov se koristi za simulaciju evaporacije i isparavanja sa površine izdani. Kôd Modflow izračunava zapreminu vode koja napušta model na osnovu maksimalnog intenziteta evapotranspiracije, koji ima dimenziju brzine, zatim nadmorske visine površine izdani sa koje se odvija evapotranspiracija i dubine na kojoj evapotranspiracija prestaje.

c) Granični uslovi sa zadatim proticajem koji zavisi od pijeziometarskog nivoa prikazuju proticaj, odnosno doticaj u model ili oticaj u njega, na osnovu razlike između zadatog pijeziometarskog nivoa u modelskoj ćeliji u kojoj je zadan granični uslov i na osnovu pijeziometarskog nivoa, koji je rezultat proračuna i konduktiviteta modelske ćelije.

Granični uslov reka se koristi za simulaciju stalnih površinskih tokova, a smer kretanja vode između reke i izdani zavisi od hipsometrijskog odnosa nivoa podzemnih voda i nivoa vode u reci.

U slučaju da je proračunati pijeziometarski nivo u izdani viši nego u reci, onda izdan “hrani” reku, te veličina doticaja u nju zavisi od veličine razlike u pijeziometarskom nivou između izračunatog nivoa izdani i zadatog nivoa u reci. Doticaj u reku, takođe, zavisi i od konduktiviteta rečnih sedimenata u okviru ćelije modela, dok, sa druge strane, reka “hrani” izdan, ukoliko je njen nivo viši od proračunatog nivoa izdani, a tada zadati nivo u ćelijama diskretizacije reke zavisi od izračunatog pijeziometarskog nivoa u ćelijama izdani. Kada nivo u ćelijama izdani opadne ispod dna rečnog sedimenata, doticaj iz reke u izdan je konstantan, što znači da reka nikada ne presušuje, pa se mora voditi računa kod primene ovog graničnog uslova.

Konduktivitet se može izračunati preko sledeće jednačine:

$$C = \frac{Klb}{m}$$

gde su:

C - konduktivitet (m^2/s),

m - debljina rečnih sedimenta (m),

b - širina rečnog korita (m),

l - dužine rečnog korita (m) i

K - koeficijenta filtracije rečnog sedimenta (m/s)

Konduktivitet se uglavnom određuje tokom etaloniranja modela, ali mogu se koristiti i neke generalne preporuke za taj parametar ili se vrši na osnovu egzaktnih podataka.

Proticaj između reke i izdani na modelu se računa preko sledeće jednačine:

$$Q = \frac{Klb}{m}(H - h)$$

gde su:

Q - proticaj između reke i izdani (m^3/s),

H - vodostaj reke u ćeliji (m) i

h - pijezometarski nivo u ćeliji ispod reke (m)

Granični uslov opšteg pijezometarskog nivoa simulira “eksterno” prihranjivanje ili dreniranje koji se nalazi van strujne oblasti obuhvaćene modelom. Proticaj (doticaj i oticaj) podzemnih voda je proporcionalan razlici pijezometarskog nivoa na “eksternom” izvoru i nivoa u ćeliji modela, a u modelu se reguliše konduktivitetom između “eksternog” izvora i ćelije modela. Jednačina za računanje proticaja je sledeća:

$$Q = C(H - h)$$

Q - proticaj (doticaj ili oticaj) ćelije (m^3/s),

C - konduktivitet ćelije (m^2/s),

H - pijezometarski nivo u ćeliji (m) i

h - izračunati pijezometarski nivo (m)

Ako je izračunati pijezometarski nivo ćeliji viši od zadatog nivoa u “eksternom” izvoru, javlja se oticaj vode iz modela, a ukoliko je izračunati nivo u ćeliji niži od zadatog nivoa u “eksternom” izvoru, dolazi do doticaja vode u model.

Za zadate velike vrednosti konduktiviteta granični uslov opšteg pijezometarskog nivoa se ponaša kao granični uslov sa zadatim konstantnim pijezometarskim nivoom. Osnovne razlike između ova dva granična uslova su sledeća:

- model računa vrednosti pijezometarskog nivoa u ćelijama u kojima je zadat granični uslov opšteg pijezometarskog nivoa, dok je kod graničnog uslova sa zadatim konstantnim pijezometarskim nivoom, kao što naziv kaže, pijezometarski nivo unapred poznat i zadat,
- modelske ćelije u kojima se zadat granični uslovi opšteg pijezometarskog nivoa ne simuliraju nepresušan izvor vode, za razliku od ćelija kod graničnog uslova sa zadatim konstantnim pijezometarskim nivoom, pa tokom proračuna one mogu presušiti (eng. “dry cells”)

Granični uslov drenaža se koristi za simulaciju otvorene i zatvorene drenažne mreže, gde se najčešće radi o drenažnim kanalima. Sličan je sa graničnim uslovom reka, a razlikuje se po tome što je smer kretanja i doticaj podzemnih voda uvek usmeren ka modelskoj ćeliji u kojoj je zadat ovaj granični uslov, a doticaj prestaje onog trenutka kada se nivo podzemnih voda spusti ispod kote dna ćelije drenaže. Na taj način je korišćenje graničnog uslova drenaža pogodno za simuliranje izvora preko kojih se obavlja pražnjenje izdani, dok se doticaj u drenažni kanal računa na sledeći način:

$$Q = C(H - h) \text{ za } H > h$$

$$Q = 0 \text{ za } H < h$$

gde su:

Q - doticaj u drenažni kanal (m^3/s),

C - konduktivitet drenažnog kanala (m^2/s),

H - pijezometrijski nivo u ćeliji (m) i

h - kota dna drenažnog kanala (m)

Parametar konduktiviteta drenažnog kanala zavisi od nekoliko faktora, a pošto ne postoji preporuka u vidu određene formule kako da se odredi, njegovo određivanje vrši se tokom etaloniranja modela.

Pored ovih graničnih uslova, koji su i najčešće korišćeni, u okviru graničnih uslova sa zadatim proticajem koji zavise od pijezometrijskog nivoa, u kódu Modflow postoje i drugi uslovi koji simuliraju proticaj, tj. doticaj u model ili oticaj iz njega, a tu spada **granični uslov “površinski tok”**, koji je u stvari kombinacija graničnog uslova za zadatim proticajem koji zavisi od nivoa i graničnog uslova sa zadatom vrednošću proticaja. **Granični uslov “površinski tok”** koristi se za simulaciju stalnih ili povremenih površinskih tokova, koji detaljnije opisuju proticaj u smislu njegove vrednosti (razlikuje se npr. između rečnih sedimenata i sedimenata korita), a umesto da se dodeli ta vrednost može se i sračunati nivo površinskog toka, i to korišćenjem drugih parametara koji su obavezni pri postavljanju za taj granični uslov, po čemu se i razlikuje od graničnog uslova “reka”, zahtevajući unos za više parametara. Pored pomenutih, postoje još i **granični uslov “jezero”** i **granični uslov “rezervoar”** (eng. „reservoir”).

Početni uslovi obuhvataju vrednosti pijezometrijskog nivoa koje su pretpostavljene na istražnom terenu u svim tačkama strujne oblasti, tj. polja diskretizacije, a u nekom početnom vremenskom trenutku. Kod postojanja kvalitetnog broja podataka o nivoima podzemnih voda postavljanje početnih uslova se sprovodi lako, a u slučajevima kada ne postoji dovoljno raspoloživih podataka, unose se proizvoljno nivoi podzemnih voda, pa se prilikom proračuna proveravaju u tačkama u kojima postoje registrovane vrednosti u prirodi.

2.4. Etaloniranje hidrodinamičkog modela

Etaloniranje hidrodinamičkog modela je proces tokom kojeg se za usvojenu šematizaciju prirodnih i eksploatacionih uslova na modelu usklađuju parametri i granični uslovi modela s ciljem dobijanja rezultata koji odgovaraju unapred postavljenim kriterijumima, kao što su mereni piježometarski nivoi u osmatračkim objektima na terenu. Kao što se iz iznetog može zaključiti, etaloniranje predstavlja stalni proces kojim se periodično uvođenjem novih podataka, rezultata istraživanja i osmatranja model sve više približava prirodnim uslovima i daje izlazne podatke najbližiji prirodi. Sinonimi za etaloniranje su kalibracija, tariranje ili identifikacija parametara. Uporednom analizom podataka merenih u prirodi i podataka dobijenih proračunom iz hidrodinamičkog modela određuje se pravac u kom se vrši izmena nepoznatih vrednosti parametara porodne sredine, sa kojima se proračun ponavlja. Stalnim ponavljanjem ovog postupka postepeno se usklađuju merene i proračunske vrednosti piježometarskog nivoa, a razlike između reziduala (merenih vrednosti nivoa podzemnih voda i vrednosti dobijenih na modelu u istim tačkama) treba da budu što manje. Proces etaloniranja hidrodinamičkog modela može se smatrati završenim kada se postigne saglasnost između vrednosti dobijenih proračunima na modelu i vrednosti registrovanih u prirodi. Kada je usklađivanje postignuto, smatra se da je model kalibrisan, odnosno da su hidrodinamičke karakteristike izdani određene sa unapred zadatom tačnošću.

Kao što je pomenuto, bazu za etaloniranje hidrodinamičkog modela predstavljaju podaci o parametrima registrovani na istražnom terenu, kao rezultat konstantnog praćenja elemenata režima podzemnih voda. Najčešći parametri koji se menjaju tokom etaloniranja hidrodinamičkog modela su hidrogeološki parametri vodonosne sredine, tj. koeficijent filtracije i specifična izdašnost izdani.

Vrednosti hidrogeoloških parametara koje su određene kalibracijom hidrodinamičkog modela obično se razlikuju od vrednosti parametara u pojedinim lokalitetima istražnog prostora, a moguće je da vrednosti parametara budu određene interpretacijom rezultata istražnih radova opterećene izvesnom greškom. Polomčić (2001) navodi da kod

etaloniranja modela poseban problem predstavlja određivanje vrednosti specifične izdašnosti izdani, pošto ona zavisi od većeg broja parametara, te je zbog toga potrebno da se na siguran način interpretiraju rezultati istraživanja, kako bi se dobile reprezentativne zavisnosti, tj. promene specifične izdašnosti po prostoru i vremenu.

Podaci koji se koriste za proces etaloniranja mogu biti različiti. Shodno tome, mogu se upotrebiti postojeći podaci, koji su rezultat nekih ranijih istraživanja, zatim, podaci istraživanja koji su namenjeni isključivo za potrebe izrade i verifikacije hidrodinamičkog modela ili pak podaci o praćenju efekata postojeće eksploatacije podzemnih voda. Pušić (1994) navodi da su podaci o praćenju eksploatacije podzemnih voda najdragoceniji, jer se pokazalo da registrovani efekti rada eksploatacionog sistema podzemnih voda nikakvim naknadnim istražnim radovima ne mogu da se zamene, dok sa druge strane, praćenje eksploatacije podzemnih voda u najvećoj mogućoj meri smanjuje potrebu za dopunskim istražnim radovima.

Etaloniranje se može vršiti i za stacionarne i za nestacionarne uslove. Iako je stacionarna kalibracija najrasprostranjenija, treba težiti tome da se uradi i nestacionarna kalibracija, jer je kretanje podzemnih voda u prirodi uvek nestacionarno. Pored toga, najčešća svrha hidrodinamičkog modeliranja je prognoza nekog budućeg stanja, što u realnosti podrazumeva komponentu vremena, a samim tim i nestacionarne uslove. Nedostatak stacionarne kalibracije je i u tome što nije moguće korišćenje specifične izdašnosti izdani u tom procesu, a taj parametar predstavlja jedan od nužnih pokazatelja preduslova dobre prognozne proračuna. Što se tiče dužine perioda za koji se sprovodi etaloniranje, trebalo bi naglasiti da ukoliko je duži period u kom se sprovodi etaloniranje, obuhvaćen je i veći dijapazon uslova režima podzemnih voda, a to znači da model ima veću mogućnost realnog odziva na širi dijapazon promene ulaznih parametara.

Etaloniranje hidrodinamičkog modela se može vršiti na dva načina, gde prvi podrazumeva "ručno" etaloniranje, kada se obavlja probanjem i oslanja se na iskustvo i znanje eksperta, dok drugi način predstavlja automatsku kalibraciju, koja se obavlja pomoću pod-programa. Jedan od najčešće korišćenih programa je PEST (Doherty and

Hunt, 2010) i uključen je u većinu grafičkih procesora za kôd Modflow. Pomoću “PEST-a” optimalni set parametara modela određuje se preko minimizacije sume kvadrata razlika između izračunatih i merenih vrednosti nivoa podzemnih voda. Obe metode etaloniranja imaju svoje pozitivne i negativne karakteristike, pa se preporučuje korišćenje obeju metoda (Polomčić et al., 2014c). Bitno je napomenuti da različite kombinacije parametara modela i graničnih uslova mogu da proizvedu vrlo slične rezultate, što znači da rešenje modela nije jedinstveno. Glavnu ulogu u tom slučaju zadobija iskustvo eksperta kod primene hidrodinamičkog modeliranja, a krajnja ocena tačnosti modela se prikazuje različitim kvantitativnim pokazateljima greške modela.

(Polomčić, 2001) interpretira proces etaloniranja hidrodinamičkog modela i određivanje hidrodinamičkih karakteristika porozne sredine na dva načina: rešenjem direktnog zadatka ili rešenjem inverznog zadatka. Kao što je već pomenuto, kod direktnog zadatka se ponašanje hidrogeološkog sistema određuje kada su poznati ulazni parametri, parcijalne diferencijalne jednačine koje opisuju kretanje podzemnih voda, granični i početni uslovi, te je identičan prognoznom proračunu. Inverznim zadatkom se uz poznavanje konačnog rešenja parcijalnih diferencijalnih jednačina kretanja podzemnih voda određuju hidrogeološki parametri, početni i granični uslovi, a prikazano je nekoliko tipova inverznih zadataka (Bachmat, 1980):

- inverzni zadatak tipa I, kada se traže hidrogeološki parametri izdani,
- inverzni zadatak tipa II, kada se traže početni uslovi,
- inverzni zadatak tipa III, kada se traže granični uslovi,
- inverzni zadatak tipa IV, kada se traže elementi ulaza, tj. izlaza hidrogeološkog sistema i
- inverzni zadatak tipa V, kada se traže istovremeno elementi ulaza i izlaza hidrogeološkog sistema.

Polomčić (2001) navodi da se najjednostavniji način etaloniranja modela vrši tako što se na modelu zadaju usvojene ili pretpostavljene vrednosti reprezentativnih dominantnih parametara sredine i režima strujanja podzemnih voda, pa se kroz iterativni proces proračuna i upoređenja rezultata proračuna sa merenim vrednostima, postepeno dolazi

do traženog rešenja, a ovaj postupak naziva se rešavanje inverznog zadatka i sastoji se iz sledećih faza:

- 1) pretpostave se neke vrednosti nepoznatih parametara,
- 2) reši se direktni zadatak sa pretpostavljenim vrednostima,
- 3) uporede se vrednosti dobijene u predhodnom koraku sa vrednostima dobijenim osmatranjima u prirodi, a u slučaju da je razlika između ovih vrednosti izvan predviđenih granica, tada se:
- 4) na osnovu tzv. algoritam prilagođavanja se menjaju vrednosti parametara iz prvog koraka i
- 5) koraci od drugog do četvrtog se ponavljaju dok se ne dobije zadovoljavajuća podudarnost merenih i sračunatih vrednosti.

Kvalitet izvedenog etaloniranja predstavlja rezultat uticaja mnogobrojnih faktora kao što su: karakteristike izučavanog hidrogeološkog sistema, karakteristike postavljenog problema i zadatka kog treba rešiti, obima i kvaliteta raspoloživih podataka, prostorne razmere posmatranja, odabranog vremenskog intervala, karakteristika modela i znanja, kao i iskustva eksperta.

Tokom procesa etaloniranja mogu se utvrditi i pojedini problemi, kao npr. da se ne raspolaže nizom relevantnih podataka neophodnih za pouzdani završetak njegovog procesa ili da su neki podaci o rezultatima istražnih radova prividno protivrečni. U navedenom slučaju se moraju izvršiti dopunski istražni radovi, a na osnovu rezultata prethodnih ispitivanja na modelu. Pušić (1994) navodi da slaganje vrednosti dobijenih iz modela i izmerenih u prirodi ne predstavlja jedini kriterijum uspešnosti etaloniranja modela, što znači da ono ne dovodi do jednoznačnog rešenja, te je problem dosta složeniji. Različiti modeli mogu zadovoljiti postavljene kriterijume simulacije rada prirodnog sistema, pa se stoga postavlja ispunjenje i drugog uslova, što podrazumeva da vrednosti parametara prirodne sredine dobijene etaloniranjem moraju zadovoljiti kriterijum pouzdanosti, shodno tome mora postojati mali rizik u vezi sa tim da će rezultati u prirodi biti izvan intervala dozvoljene greške. Greške koje se javljaju u

procesu hidrodinamičke analize uopšte, pa i kod izrade i etaloniranja hidrodinamičkog modela su neretko sledeće (Polomčić, 2001):

- greške vezane za šematizaciju hidrogeološkog modela,
- greške kod ulaznih podataka, najviše usled neispravnosti instrumenata pomoću kojih su merene određene veličine, pogrešne metode određivanja ulaznih parametara; zatim usled pogrešnog očitavanja, zaokruživanja i prenosa podataka, koje se mogu manifestovati preko:
 - vrednosti hidrogeoloških parametara i
 - vrednosti početnih pijezometarskih nivoa i proticaja;
- greške vezane za postupak proračuna što uključuje izbor numeričke metode,
- greške vezane za izbor prostorne diskretizacije i vremenskog intervala,
- greške subjektivne prirode, koje zavise od znanja i iskustva eksperta i
- greške u izabranom softverskom paketu.

2.5. Analiza osetljivosti hidrodinamičkog modela

Za ocenu osetljivosti hidrodinamičkog modela na promenu veličina ulaznih parametara koristi se parametarska analiza osetljivosti hidrodinamičkog modela, koja se obavlja istovremeno sa etaloniranjem hidrodinamičkog modela. Vrednost jednog parametra ili graničnog uslova se menja u razumnim granicama, dok se svi ostali drže konstantnim, a pri tome se vrši registrovanje promena u rezultatu simulacije na modelu, uglavnom kod pijezometarskih nivoa ili bilansa podzemnih voda. Isti proces ponavlja se sa sledećim parametrom, dok su svi ostali konstantni, a testirani parametri i granični uslovi se rangiraju prema uticaju koji imaju na krajnje rešenje modela. Najosetljiviji parametar je onaj parametar kod koga i minimalne promene vrednosti prouzrokuju značajne promene u rezultatu modela. Valja istaći da se, pored promene hidrogeoloških parametara i graničnih uslova, mogu menjati i diskretizacija prostora i vremena, što podrazumeva promenu veličina ćelija ili vremenskog koraka.

U praksi se tokom izrade hidrodinamičkog modela proces analize osetljivosti modela sastoji od sledećih koraka (Polomčić, 2014): postave se hidrodinamičke karakteristike

sredine, a zatim se polazeći od zadatog početnog stanja koristeći unapred definisane ili delimično pretpostavljene granične uslove, proticaje i parametre bilansa, sprovode hidrodinamički proračuni. Kao rezultat ovih proračuna dobija se raspored piježometarskih nivoa i njihova promena tokom vremena, koji se potom upoređuju sa odgovarajućim vrednostima registrovanim u prirodi. Takode, u zavisnosti od konkretnih uslova i karaktera graničnih uslova, mogu se dobiti i vrednosti proticaja (doticaja ili oticaja) koji se porede sa rezultatima osmatranja. Neslaganja uočena kod ovog upoređenja ukazuju na potrebu dalje analize ulaznih podataka, kao i na izbor novih vrednosti pomoću kojih će se proračun ponoviti. Pošto postoji velik broj parametara koji se mogu menjati, postavlja se pitanje koje od njih treba menjati, a pored toga, javlja se i niz drugih problema o kojima treba voditi računa pri analizi osetljivosti modela u procesu etaloniranja.

2.6. Verifikacija hidrodinamičkog modela

Verifikacija modela je proces provere etaloniranja modela, gde se simulira neko poznato stanje hidrogeološkog sistema koje nije bilo korišćeno pri izradi hidrodinamičkog modela. To novo stanje obuhvata neke druge hidrološke i hidrodinamičke uslove u odnosu na stanje režima podzemnih voda i granične uslove za vremenski period za koji je model etaloniran, dok se svi ostali parametri modela kao što su geometrija sredine, hidrogeološki i hidrodinamički parametri ne menjaju. Neki od primera verifikacije modela su: simulacija rezultata crpenja (opitnog ili eksploatacionog), simulacija posledica promene nivoa u reci ili simulacija promenjenog prihranjivanja izdani. Ukoliko se i za novu situaciju merene i računске vrednosti parametara zadovoljavajuće slažu, smatra se da je model verifikovan i spreman za prognozne proračune, a ukoliko se desi da ne postoji odgovarajuće poklapanje modela na promenu stanja, parametri modela nisu dobro postavljeni, te se kalibracija mora ponovo izvesti.

2.7. Prognozni proračuni hidrodinamičkog modela - eksploatacija hidrodinamičkog modela

Korišćenje hidrodinamičkog modela za prognozu u različite svrhe predstavlja krajnju fazu celokupnog napora oko njegove izrade i vrši se na etaloniranom i verifikovanom modelu. Rešenje etaloniranog i verifikovanog modela najčešće predstavlja početno stanje za sve planirane prognoze. Najčešće se vrši prognoza budućeg režima podzemnih voda ili prognoza unapred po vremenu. Klasična prognoza ili simulacija režima podzemnih voda predstavlja rešenje direktnog zadatka, a sastoji se u tome da se na modelu zadaju željeni ulazni parametri, dok se kao rezultat dobijaju vrednosti parametara režima podzemnih voda, uglavnom nivoi podzemnih voda ili proticaji. Stepenu pouzdanosti prognoznih proračuna zavisi od perioda za koji se oni sprovode i od načina zadavanja graničnih uslova. Povećanjem prognoznog perioda, stepen pouzdanosti dobijenih rezultata prognoznih proračuna opada, jer obično nije moguće da se kroz proces etaloniranja definišu parametri u široj zoni terena koju zahvata dugotrajna eksploatacija.

Prelazak sa faze etaloniranja i verifikacije hidrodinamičkog modela na prognozne proračune varijantnih rešenja predstavlja ekstrapolaciju uslova za koje je izvršeno etaloniranje na neke nove uslove, koji su vezani za izmene ili zadavanje novih graničnih uslova. Kod faze prognoznih proračuna, geometrijske karakteristike modela se ne menjaju, izuzev ako u prognoznim proračunima dolazi do promene usled antropogenih ili prirodnih aktivnosti, a ne menjaju se ni filtracione karakteristike. Takođe, javljaju se određene poteškoće kod ekstrapolacije tj. prognoze ulaznih parametara. Pušić (1994) navodi da razmatranjem rešenja problema kroz njegovo poređenje više varijanti uobičajeno da se proračuni prognoze efekata primene tehničkog rešenja po varijantama sprovode za izabran jedan ili više vremenskih intervala, koji predstavljaju određenu verovatnoću pojave režima podzemnih voda, te se tako, pored determinističkih komponenti sadržanih u samom modelu, uvodi i određeni stepen slučajne stohastičke komponente u prognozirani režim podzemnih voda.

Prognozni hidrodinamički proračuni režima podzemnih voda u novim uslovima daju daleko veću prednost u odnosu na ostale metode interpretacije i prognoze. Prilikom rešavanja postavljenog problema primenom prognozne hidrodinamičke analize dobijaju se obično nekoliko varijante rešenja, pri čemu se uglavnom radi o projektovanju sistema odbrane ili zahvatanja podzemnih voda. Nalaženje optimalnog rešenja je neretko veoma komplikovano, pa se za te svrhe dalje preporučuje neka višekriterijumska optimizaciona metoda, kao što je u ovom radu primenjena fazi optimizacija.

2.8. Noveliranje hidrodinamičkog modela

Posle prognoznih hidrodinamičkih proračuna i usvajanja optimalne varijante rešenja ne završava se proces hidrodinamičke analize, već sledi i faza noveliranja hidrodinamičkog modela, kojom se podiže stepan tačnosti modela. Faza noveliranja hidrodinamičkog modela podrazumeva novi monitoring režima podzemnih voda u stanju tokom rada projektovanog sistema, pa se tim putem omogućuje dodatna verifikacija prognoznih hidrodinamičkih proračuna i usvojene varijante rešenja, a samim tim i eventualne korekcije.

Pored toga, noveliranje modela ne mora biti vezano samo za prikupljene podatke o izmenjenim uslovima režima podzemnih voda (Polomčić, 2014), već i rezultati dodatnih hidrogeoloških istraživanja mogu doprineti preciziranje nekih parametara modela koji su bili manje poznati, te zbog toga pretpostavljeni u prvim koracima kreiranja hidrodinamičkog modela. Ovo se može odnositi na raspored litoloških i hidrostratigrafskih članova, njihove filtracione karakteristike ili preciziranje zona prihranjivanja i dreniranja izdani. Shodno tome, ovaj proces je i nazvan **rekalibracija** ili **reecaloniranje modela**. Samim uvođenjem određenih preciziranih parametara u hidrodinamički model dolazi do relativno drugačijih izlaznih rezultata koji se tiču modela ili njegovog dela, stoga je ovako rekalibrisani model prihvatljiviji i približniji prirodnim uslovima.

2.9. Prikaz rezultata hidrodinamičkog modeliranja

U prethodnom poglavlju je prikazana šema izrade hidrodinamičkog modela, a nadalje je prikazan način na koji treba da se prikažu rezultati istraživanja koji su korišćeni za potrebe izrade hidrodinamičkog modela i rezultati koji proizilaze iz samog modela (Polomčić, 2014).

Prema tome, tabelarno se prikazuju:

- koordinate objekata koji su poslužili za izdvajanje litoloških članova sa njihovim kotama povlate i podine,
- podaci o hidrogeološkim parametrima,
- podaci o registrovanim nivoima podzemnih voda,
- podaci o prirodnim izvorima prihranjivanja izdani i zonama dreniranja,
- podaci o vodozahvatnim objektima i njihovom radu i
- bilans podzemnih voda.

Dijagramima se prikazuju:

- promene nivoa podzemnih voda u funkciji vremena,
- istorijat promene graničnih uslova tokom vremena,
- istorijat zahvatanja podzemnih voda po vodozahvatnom objektu,
- zavisnost merenih i računatih nivoa podzemnih voda za svaki osmatrački objekat,
- prikaz korelacione zavisnosti računskih i merenih vrednosti piježometarskih nivoa i
- uporedni prikaz efekata različitih varijanti rešenja postavljenog zadatka.

Slikama ili priložima prikazuju se:

- rasprostranjenje strujne oblasti u planu i profilu,
- 3D blok dijagrami hidrogeološkog modela,

-
- karta prostorne diskretizacije strujne oblasti,
 - profili sa karakterističnim modelskim slojevima,
 - karte površine terena i podine svakog modelskog sloja,
 - karte sa inicijalnim vrednostima hidrogeoloških parametara za svaki modelski sloj,
 - karte sa graničnim uslovima za svaki modelski sloj,
 - karte hidroizohipsi ili hidroizobata sa rasporedom osmatračkih objekata,
 - karte sa rasporedom vrednosti hidrogeoloških parametara za svaki modelski sloj,
 - karte bilansa podzemnih voda kao rezultat kalibracije modela,
 - uporedne karte merenih i računatih nivoa podzemnih voda,
 - karte rasporeda pijezometarskog nivoa za svaku varijantu proračuna,
 - karte lokacija drenažnih objekata kao rezultat prognoznih proračuna sprovedenih prema varijantama i
 - karte rasporeda pijezometarskih nivoa kao rezultat rada drenažnih sistema prema varijantama.

3. Primena fazi logike u hidrogeologiji i hidrodinamici

U trećem poglavlju druge celine rada opisan je osnovni koncept fazi teorije i fazi logike, kao i terminologija i metode fazi logike, koje se mogu primeniti u hidrogeologiji i hidrodinamici.

3.1. Istorijat razvoja i osnovni koncept fazi logike

Tokom poslednjih godina uočava se rastući trend primene sistema baziranih na fazi teoriji. Fazi logika ima dvostruko značenje, te u užem smislu označava logički sistem koji predstavlja proširenje klasične („dvovalentne“) logike, dok u širem smislu označava sinonim za teoriju fazi skupova, tj. teoriju koja povezuje klase objekata sa granicama skupa koje nisu toliko oštre (Klir & Yuan, 1995).

Zadeh (1975) navodi da fazi logika omogućava bolje objašnjavanje stanja i redukciju kompleksnosti nekog sistema, čime se razlikuje od klasične ili dvo-vrednosne logike u kojoj se neko stanje može predstaviti samo kao „postoji“ ili „ne postoji“. Klasična logika se bazira na binarnom sistemu, pa stoga određeno stanje može biti tačno (1) ili netačno (0), dok sa gledišta teorije skupova da pripada ili ne pripada skupu. Fazi logika, postavljajući se kao više-vrednosna, dopušta opseg vrednosti između binarnih, odnosno isključivih tvrdnji: „da-ne“ ili „istinito-ne istinito“ (Zimmermann, 1996), kod kojih se pripadnost nekog elemenata skupu meri stepenom pripadnosti. Zadeh (1965) u radu „Fuzzy Sets - Information and Control“ proširuje definiciju pripadnosti u odnosu na klasične skupove i uvodi fazi skupove kao osnovu fazi logike, kod koje je dozvoljeno da element pripada delimično jednom skupu. Pripadnost elementa skupu se proširuje, a on se može opisati realnom vrednošću iz opsega od 0 do 1, pa tako određeni element (odnosno svojstvo) može imati pripadnost 0,3, što znači da pripada 30% datom skupu. Objava pomenutog naučnog rada predstavlja uspostavljanje osnovnih principa primene fazi logike, a već 70-ih godina XX veka počinje lagani razvoj koji se tiče njene primene.

Prvobitna primena fazi logike implementirana je prilikom obrade podataka koji dopuštaju parcijalnu, odnosno, delimičnu pripadnost skupovima, pa se ovakvim

pristupom izbegava potpuna pripadnost ili nepripadnost nekom skupu. U savremenoj primeni fazi logika predstavlja upravljačku metodologiju, a teorija fazi skupova je naučno zasnovan pristup koji koristi iskustvo i intuiciju stručnjaka (Zadeh, 1965).

Fazi logika pripada sistemima koji tretiraju probleme sa stanovišta nepreciznosti, pri čemu je glavni cilj eksploatacija tolerancije koja postoji pri nepreciznosti, nejasnoći i parcijalnoj istinitosti u svrhu postizanja robusnijih i jeftinijih rešenja. Shodno tome, fazi logika daje matematički formalizam za postizanje takvog cilja (Zadeh, 1979). Fazi skupovi i fazi logika (Mayer, 1990) su sistemi koji su zasnovani na znanju (eng. „knowledge based system“) i baziraju se na principu „mekog računanja“ (eng. „soft computing“). Primenom ovakvog principa mogu se obraditi vrednosti koje imaju elemente neizvesnosti, nepreciznosti ili nedovoljne jasnoće. Pored navedenog, Mayer (1990) ističe da se uvećanjem složenosti sistema smanjuje mogućnost preciznog opisivanja njegovog ponašanja. Polazna osnova Zadeha predstavlja formiranje modela „soft računarstva“ koji je zasnovan na sličnim principima na kojim funkcioniše ljudski mozak, te se ukazuje kao „delotvoran u neizvesnom, nepreciznom i nesigurnom okruženju“ (Klir i Folger, 1988). Pored fazi logike, postoje i druge discipline „soft računarstva“, kao što su: probabilističko zaključivanje, neuro-računarstvo (neuronske mreže), genetski algoritmi, haotični sistemi (teorija haosa), tzv. mreže uverenja, teorija učenja, ekspertski sistemi, anticipatorski sistemi i celularni automati (Dubois & Prade, 1998). „Soft računarstvo“ je, u stvari, alternativni pristup klasičnom pristupu tretiranja neizvesnosti, gde se kao njegov primarni cilj izdvaja smanjenje neizvesnosti razvojem brzih algoritama i tačnijeg računanja na osnovu prikupljenih ili dobijenih podataka.

Iako se osnove fazi logike vezuju za radove Zadeha (1965; 1975), prvo istraživanje fazi skupova započeo je Lukasiewicz (1920), koji razmatra trovrednosnu logiku (treća vrednost je između tačnog i netačnog) i uvodi logičke operatore: negacija ($\neg$), slaba konjunkcija ($\wedge$), slaba disjunkcija ($\vee$), implikacija ($\rightarrow$), ekvivalencija ($\Leftrightarrow$), jaka konjunkcija ($\otimes$) i jaka disjunkcija ($\oplus$). Ovakav pristup primenjen je na matematičkom predstavljanju osnovnih nejasnoća, kao što su visok, star i vruće. Za razliku od klasične logike, koja vrši operacije samo sa dve vrednosti: „1“ (tačno) i „0“ (netačno),

Lukasiewicz (1920) uvodi sve realne brojeve u intervalu između 0 i 1, u cilju predstavljanja stepena verovatnoće istinitosti iskaza. Ukoliko se navedeno implementira na geonauke, verovatnoća da je širina zeva neke pukotine od 1 cm visoka može biti postavljena sa vrednošću od 0,87. Ova istraživanja dovela su do formiranja neegzaktne tehnike razmišljanja, koja je kasnije uspostavljena kao teorija verovatnoće. Takođe, treba pomenuti istraživanja Black-a (1937), iz kojih se naziru koreni fazi logike. Black daje značajan doprinos vezan za način definisana fazi skupa i operacije sa fazi skupovima, a posebno ističe pojam „neodređenost”, gde pored pojmova „nepreciznost” i „neizvesnost” ukazuje na problem svakog podatka ili informacije sa kojima se susreće naučnik ili inženjer u praksi. Sva tri navedena pojma predstavljaju domen istraživanja fazi logike za razliku od klasične logike, u kojoj svaki podatak ili informacija moraju biti precizni i kompletni.

Sa stanovišta hidrogeologije, prilikom razmatranja ulaznih parametara za hidrodinamički model, često se ne raspolaže dovoljno preciznim podacima, kao što je npr. vrednost efektivne infiltracije. Generalno, ova veličina se izračunava iz odnosa ukupne infiltracije, isparavanja sa nivoa podzemnih voda, stvarne evapotranspiracije i oticaja. Međutim, kako bi se odredila ova vrednost neophodni su i drugi parametri, kao što su dubina do nivoa podzemnih voda, promena vlage u zemljištu sastav tla i nadizdanske zone i dr. Zbog nemogućnosti preciznog merenja navedenih parametara, eksperti su u praksi često prinuđeni da koriste različite aproksimacije, zasnovane na različitim više ili manje subjektivnim procenama. Uključivanje nedovoljno precizno određenih parametara u modelska istraživanja nadalje konsekvantno dovodi do drugih grešaka, kao što su npr. veličina gradijenta pritiska.

Ovaj primer ukazuje da neretko postoji neizvesnost u pogledu ulaznih podataka koji su neophodni za donošenje određenih odluka. Stoga se u određenim situacijama odluka može doneti na osnovu iskustva ili subjektivne procene određenih parametara od strane donosioca odluke, tzv. eksperta. Ove subjektivne procene se mogu razlikovati uzev u obzir donosioca odluke, pa npr. veličina efektivne infiltracije procenjena na 10% od padavina iz datog primera može da bude „mala“, „ne tako mala“ ili „srednja“.

U cilju rešavanja navedenih problema, a u slučajevima kada su parametri nedovoljno izvesni, neodređeni ili subjektivno procenjeni, neophodno je primeniti matematičke metode koji mogu na zadovoljavajući način da tretiraju neizvesnost, neodređenost ili subjektivnost. Stoga, teorija fazi skupova ili „skupova bez oštih granica“ predstavlja veoma pogodan matematički aparat za tretiranje neizvesnosti, subjektivnosti, neodređenosti ili višeznačnosti. Bazirana na znanju eksperta za opis nekog sistema, teorija fazi skupova znanje izražava na prirodan način - lingvističkim varijablama, o kojima će dalje biti reči, pa se može reći da je fazi logika „računanje rečima“.

Mnogi fenomeni u prirodi, kao i pojave, stanja i dešavanja, povezani su raznovrsnim vezama koje čine celine i koje nazivamo sistemima. Sistem predstavlja određen skup međusobno povezanih pojava, u kome se međusobno delovanje odvija na pravilan način, odnosno, prema određenim zakonima. Sistem je uopšteno opisan ulaznim podacima, događajima u sistemu, kao i izlaznim podacima, stoga su ulaz u sistem i izlaz međusobno zavisni (Miletić & Heinrich-Miletć, 1981). U ovom slučaju hidrogeološki sistem (Polomčić, 2001) čine „ulazni elementi“ (podzemni doticaj, infiltracija padavina, infiltracija voda površinskih tokova, površinski doticaj, veštačko prihranjivanje), „izlazni elementi“ (evapotranspiracija, prirodno i veštačko dreniranje) i „karakteristike i procesi porozne sredine“ (filtracije vode kroz poroznu sredinu, transport materije i toplote izdanskim tokom). Kod svih sistema, pa tako i hidrogeološkog sistema, eksperti se suočavaju sa problemima koji nastaju prilikom njegove identifikacije. Klasična teorija tih sistema zasniva se na njegovim jasnim matematičkim modelima, pa, ukoliko se posmatra npr. elektromehanički sistem, matematički model se može razviti, jer su fizički zakoni tih sistema jasno definisani. Međutim, za veći broj problema koji se javljaju u hidrogeologiji, matematičko modeliranje je veoma komplikovano i zahteva puno znanja i vremena. Tako, ukoliko se krene od osnovnog koraka - prikupljanja i dobijanja informacija o nekom istražnom području, već se javlja problem s pitanjem: **„Da li su podaci sigurni, kompletni (u dovoljnom obimu) i dovoljno precizni?“**

Kao karakterističan primer nesigurnih i nepreciznih podataka navešće se primer sa površinskog kopa „Drmno“ (Bajić et al., 2014). Uporednom analizom proticaja bunara i registrovanih nivoa podzemnih voda, konstatovano je da proticaji i nivoi bunara nisu u

međusobnoj saglasnosti, što je uslovljeno delom heterogenošću sredine, diferencijalnoj proceni ulaznih parametara i drugim razlozima. U nezanemrljivom broju bunara registrovane su relativno velike depresije za relativno male proticaje, dok su nivoi u bunarima koji nisu u radu (eksploataciji), kao i u pratećim piježometrima bili relativno visoki. Pored toga, registrovana je i pojava neodgovarajućih nivoa podzemnih voda, koja se javlja kao posledica promene kapaciteta bunara, bez osetnijeg uticaja okolnih bunara u radu. U tabeli II-3.1 su prikazane navedene pojave jednog dela drenažnih bunara za izdvojeni period osmatranja, uzetih nasumice:

Tabela II-3.1: Problem ne-preciznosti, ne-određenosti i ne-izvesnosti kod hidrogeoloških podataka na primeru površinskog kopa „Drmno“ (Bajić et al., 2014)

Bunar	2/13/2008		2/20/2008		2/27/2008		3/5/2008		3/11/2008	
	NPV (m)	Q(l/s)	NPV (m)	Q(l/s)	NPV (m)	Q(l/s)	NPV (m)	Q(l/s)	NPV (m)	Q(l/s)
PLC-X-1	26.97	3.55	27.16	3.13	27.18	3.33	27.57	2.98	27.39	3.20
SLC-X-1	30.60	4.50	30.79	4.50	30.33	4.62	29.99	4.42	29.77	4.04
PLC-X-2	20.76	4.71	20.54	4.62	20.17	4.58	19.55	4.18	19.16	4.50
SLC-X-2	28.40	3.07	28.57	3.25	28.39	3.59	27.06	3.80	26.79	3.40
PLC-X-3	10.18	2.61	8.96	2.62	8.68	2.61	8.85	2.65	8.38	2.53
SLC-X-3	14.80	3.59	13.91	3.63	13.51	4.00	13.27	3.25	11.59	2.99
SLC-X-4	13.07	1.69	13.18	1.71	13.34	1.65	12.18	1.65	12.46	1.68
PLC-X-5	18.10	1.29	17.20	1.27	17.40	1.15	19.31	1.19	17.24	1.21
B-2	19.08	5.69	18.86	5.47	19.05	5.50	18.90	5.47	17.21	5.49
SLC-X-5	18.76	2.66	17.17	2.45	18.92	3.33	17.29	3.04	17.42	2.52
PLC-X-6	27.55	1.98	27.43	1.80	27.32	1.83	27.65	1.85	25.46	2.01
SLC-X-6	23.02	4.04	23.74	5.00	24.78	3.73	22.35	3.55	22.37	3.17
PLC-X-7	31.69	4.44	31.34	5.52	31.01	4.92	31.00	4.97	30.09	4.73
SLC-X-7	33.22	4.65	33.60	4.78	32.80	5.15	32.55	4.95	32.71	4.31
PLC-X-8	44.27	2.93	44.15	2.80	44.49	2.48	50.96	2.46	43.66	2.89
SLC-X-8	43.47	4.44	43.51	4.85	43.38	4.56	43.29	4.50	43.03	5.07
PLC-X-9	38.13	3.04	36.64	3.20	38.16	3.86	38.24	3.20	36.26	3.20

LEGENDA:	↑ NPV - ↓ Q	NELOGIČNO	↓ NPV - ↑ Q	LOGIČNO
	↓ NPV - ↓ Q		↑ NPV - ↓ Q	
	↑ ili ↓ NPV - Q = const			
	NPV=const - ↓ Q			
	↑ NPV - ↑ Q			

Q - kapacitet bunara (l/s)
NPV - nivo podzemnih voda

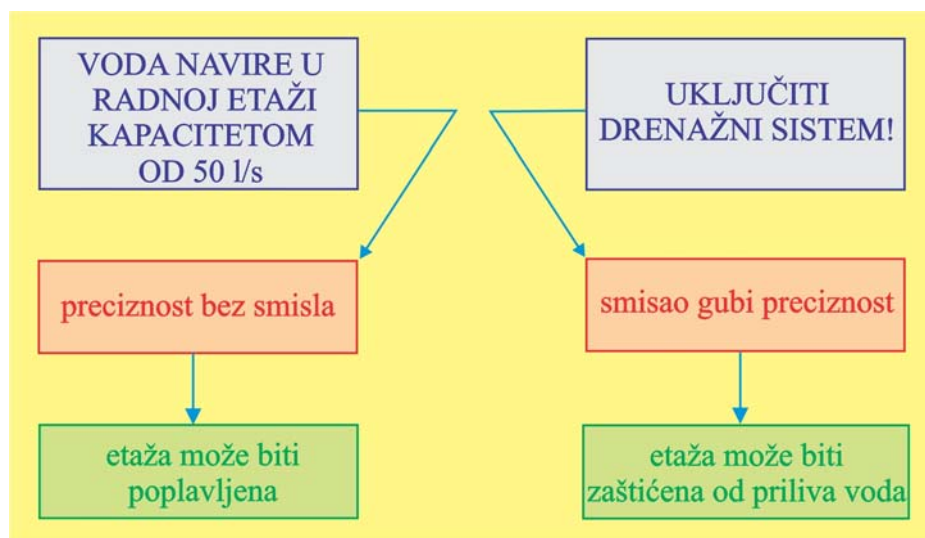
Verbalni način izražavanja predstavlja pogodan način na koji istraživač može izraziti svoje mišljenje, a ova činjenica uslovljava značajan izvor neizvesnost, kako zbog prenosa informacija, tako i znanja koje prati različite vrste neodređenosti i nepreciznosti (Kosko, 1993; Orchard, 1998). Prikazanim primerom (tabela II-3.1) ukazano je da sam jezik predstavlja značajan izvor neizvesnosti, kao i da prenos informacija i znanja prate različite vrste neodređenosti i nepreciznosti. Zaključuje se da se u kontekstu kao glavni izvori neizvesnosti najčešće pojavljuju: nepoduzdani izvori podataka i informacija,

zahtevana energija za dobijanje sigurnosnih podataka, nepreciznost prirodnog jezika, mnoštvo nekonzistentnih podataka kao posledica nedovoljnog razumevanja sistema, konfliktni ili komplementarni izvori činjenica, kao i posledica eksperimentalne greške pri merenju, neizvesnosti u proceni, slučajnosti događaja, nedostataka evidencije ili nedostataka izvesnosti u evidenciji. Svi navedeni elementi predstavljaju problem za selekciju podataka, pošto se ne mogu okarakterisati kao pouzdani za formiranje ulaznih podataka u hidrodinamički model, što svakako predstavlja zahtevan zadatak, imajući u vidu samu namenu modela, a to su rešavanja kompleksnih problema vezanih za prognozne proračune i efekte rada sistema za odvodnjavanje.

Osvrtanjem na klasičan pristup tretiranju neizvesnosti, koji ima široku primenu u hidrologiji, kao što su teorija verovatnoće i njen stohastički pristup, svaka slučajnost se opisuje neizvesnim brojem koji je modeliran slučajnom promenljivom. Kod ovog postupka se prvo pretpostavi tip raspodele i vrednosti parametara raspodele verovatnoće slučajne promenljive, pa se formira hipoteza koja može biti tačna ili pogrešna. Nakon pomenutog radi se verifikacija vrednosti parametara raspodele slučajno promenljive testovima ili tzv. postupak provere hipoteze. Na osnovu podataka iz evidencije se određuje interval u kojem mora da se nađe vrednost razmatranog parametra, te se testovima utvrđuje da li se hipotetička vrednost razmatranog parametra nalazi u određenom intervalu ili je van njega, potom se hipoteza ili usvaja ili odbacuje. Ovde se nailazi na izvesna ograničenja, kao što je izračunavanje verovatnoće svake slučajne veličine, što zahteva veliki broj podataka, ali i činjenica da kombinacija različitih neizvesnosti dovodi do složene raspodele verovatnoće, koja opet zahteva složene matematičke izraze. Dalji razvoj nauke omogućio je da se neizvesnost i nepreciznost opisuju na drugačiji način, čime se postižu robusnija i u određenim slučajevima efikasnija rešenja. Jedan od pristupa predstavlja primena teorije fazi skupova i fazi logike, tj. fazi logičkih sistema, gde je njihova suština rad sa znanjem koje može biti veoma neprecizno i izraženo u verbalnom obliku. „Znanje“ se u fazi logičkim sistemima predstavlja u obliku produkcionih (ekspertskih) pravila, koja su pogodan verbalni oblik za izražavanje znanja. Nasuprot pomenutom, u klasičnim ekspertnim sistemima se upotrebljavaju produkciona pravila, ali takvi sistemi ne mogu da reše problem ukoliko su informacije neodređene, nepotpune ili neprecizne (Graham, 1991). Shodno tome se

npr. statističke metode ne mogu koristiti kada ne postoji dovoljan skup informacija o nečemu, kao u slučajevima, odnosno područjima u kojima su hidrogeološka istraživanja tek započeta, ili pak u slučajevima gde nije ekonomski opravdano vršiti obimna istraživanja. Upravo je na ovakvim primerima primenom fazi logike moguće doneti adekvatnu odluku, pošto predstavlja „**kodifikaciju zdravog razuma**“.

Uvođenjem pojma „fazi skup“ na matematički način prikazuju se „nejasnoće u svakodnevnom životu“. Zadeh (1965) navodi da velikom broju slučajeva nisu potrebni matematika i precizno izražavanje za rešavanje određenih problema, te je neophodno istaći često citiranu izjavu ovog autora: **„Kako kompleksnost raste, precizne izjave gube svoj smisao, a smislene izjave svoju preciznost.“** Navedeni citat bi značio da kada se povećava kompleksnost sistema, mogućnost da se napravi precizno, a u isto vreme i značajno tvrđenje o njegovom ponašanju se smanjuje dok se ne dostigne prag, posle čega preciznost i značaj postaju gotovo isključive osobine. Ovakav primer smisla fazi logike prikazan je i na slici II-3.1 (Bajić et al., 2014). Ako se izjavi: „Voda navire u radnoj etaži kapacitetom od 50 l/s“, shvata se da je to preciznost bez smisla, jer tom izjavom neće se odbraniti kop od priliva podzemnih voda. Izjavom: „Uključi drenažni sistem!“ gubi se preciznost smisla, ali time se može zaštititi radna etaža od priliva podzemnih voda. Zbog toga Zadeh (1965) predlaže da se sa složenim problemima treba izboriti tako što se, umesto rigoroznosti, što većoj preciznosti opisa i razmišljanja o pojavama, pristupa upravo u suprotnom pravcu i dozvoljava da budu neprecizni, odnosno nedovoljno precizni. U ovome se ogleda i sam smisao fazi logike, odnosno transformaciji nejasnog u nešto što je od koristi.



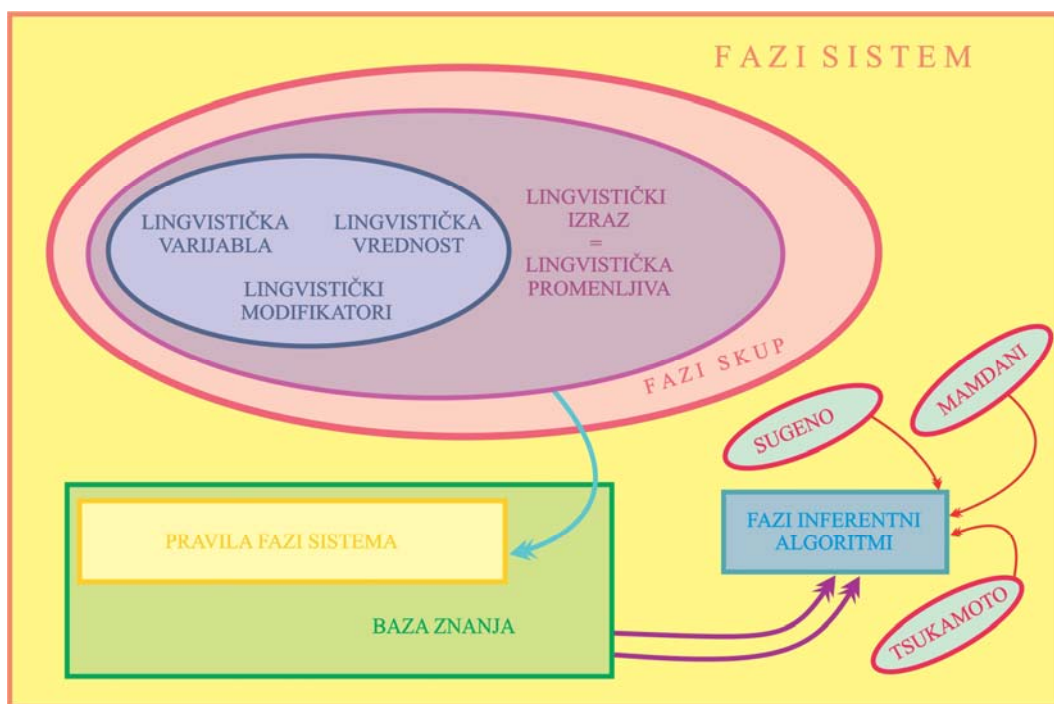
Slika II-3.1: Smisao fazi logike (Bajić et al., 2014)

3.2. Terminologija fazi logike

Osnovna jedinica za prikaz znanja kod fazi logike je lingvistička varijabla sa svojim lingvističkim vrednostima koje čine fazi skupove. Kombinacije varijabli i njenih vrednosti čine lingvistički iskaz (izraz), koji predstavlja most između numeričkog predstavljanja informacija i heurističkog pristupa (čovekovog načina razmišljanja). Zadeh (1975) prvi uvodi „lingvističku (fazi) promenljivu“, što je u stvari vrednost neizvesnosti opisan lingvističkim iskazom. Lingvistička ili fazi promenljiva se definiše kao promenljiva čije su dozvoljene vrednosti reči prirodnog jezika, a ne brojevi. Drugim rečima, lingvistički iskazi se u pristupu „soft računarstva“ (Dubois & Prade, 1998) nazivaju ustvari lingvističke promenljive.

Lingvistički iskazi podležu pravilima fazi sistema, koji su u literaturi prisutni kao sinonimi pod nazivom „ekspertska“ „produkciona“ ili „lingvistička“ pravila. Pravila fazi sistema čine bazu znanja, koja se „obrađuje“ fazi inferentnim algoritmima. Rezultati posledičnog dela fazi „if-then“ pravila („ako-onda“), po čemu se i ovi inferentni algoritmi razlikuju međusobno, mogu se prikazati u različitim oblicima: fazi skupa - Mamdani algoritam (Mamdani, 1977), funkcije - Sugeno algoritam (Sugeno, 1977) ili monotono opadajuće ili rastuće funkcije - Tsukamoto algoritam (Tsukamoto, 1979).

Ova tri navedena algoritma imaju najširu primenu. U navedenom se i ogleda doprinos (prednost) fazi logike, jer nestrukturirana heuristička tvrđenja, koja se opisuju lingvističkim izrazima, mogu da se prevedu u matematički algoritam. Na slici II-3.2 prikazana je šema fazi sistema.



Slika II-3.2: Šema fazi sistema

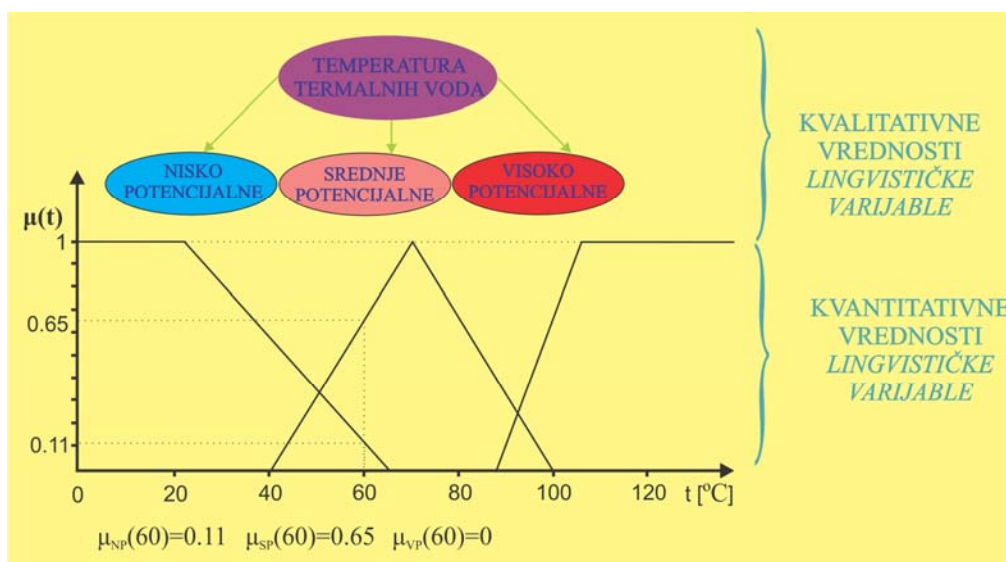
Dalji razvoj fazi logike dovodi do mogućnosti da se lingvističke promenljive realnije kvalitativno opišu, što podrazumeva uvođenje lingvističkih modifikatora, kako bi se bliže opisale osnovne vrednosti lingvističke promenljive.

Ilustrativan primer u hidrogeologiji predstavlja lingvistička promenljiva „kvalitet podzemnih voda“, koja može da se opiše lingvističkim izrazima: „izuzetno dobar“, „veoma dobar“, „dobar“, „nedovoljno dobar“, „nezadovoljavajuće dobar“. U ovom slučaju lingvistički modifikatori su: „izuzetno“, „veoma“, „nedovoljno“ i „nezadovoljavajuće“. Na taj način, lingvistička promenljiva „kvalitet podzemnih voda“ koja je opisana lingvističkim izrazom „izuzetno dobar“ bolja je od lingvističke

promenljive „kvalitet podzemnih voda“, koja je opisan lingvističkim izrazom „veoma dobar“.

Pored simbolične lingvističke forme, lingvističke varijable imaju i definisanu kvantitativnu analitičku formu, tj. funkciju pripadnosti, pa se zaključuje da su dualne prirode. Tako ovaj dualitet čini lingvističke varijable podesnim za izvršavanje i kvalitativnih, tj. simboličkih računjanja i kvantitativnih, tj. numeričkih računanja. Na ovaj način se ostvaruje veza između prirodnog jezika, koji koristi čovek, i numeričkih podataka, koje koristi računar.

Karakterističan primer u hidrogeologiji predstavlja lingvistička varijabla „temperatura termalnih voda“ i pripadajuće lingvističke vrednosti: „nisko potencijalne“, „srednje potencijalne“ i „visoko potencijalne“ (Bajić et al., 2014). Ilustrativni primer je prikazan na slici II-3.3, gde se mogu videti i kvalitativne i kvantitativne vrednosti: funkcije pripadnosti (μ) lingvističke varijable. Posmatrana lingvistička varijabla ima i stvarni fizički domen u kome elementi iz posmatranih lingvističkih vrednosti jasno poseduju i svoje numeričke vrednosti. Ovde je to prikazano funkcijom pripadnosti (μ) za 60°C.



Slika II-3.3: Lingvistička varijabla „temperatura termalnih voda“ (Bajić et al., 2014)

3.3. Fazi skupovi u fazi logici

Klasični skupovi (eng. „crisp sets“) su skupovi sa oštrim i preciznim granicama koje razdvajaju elemente - pripadnike određenog skupa od elemenata izvan posmatranog skupa, odnosno, za svaki posmatrani element se utvrđuje pripadnost određenom skupu (Perović et al., 2007).

Shodno tome, klasični skup A realnih brojeva manjih od broja 20 može se predstaviti kao:

$$A = \{x | x < 20\}$$

Na broju 20 postoji jasna i čvrsta granica pripadnosti skupa, pa ukoliko je broj x manji od broja 20, onda on pripada skupu A , a u suprotnom x nije element skupa A .

Iako su klasični skupovi veoma pogodni za primenu i predstavljaju važan matematički aparat, oni ipak ne prikazuju prirodan način ljudskog razmišljanja koje je u velikoj meri apstraktno i nedovoljno precizno (Ross, 2004).

U cilju ilustracije moguće je matematički predstaviti skup B - „teren sa dobrim hidrogeološkim svojstvima stena“ kao skup čiji koeficijenti pražnjenja α prelaze vrednost od 0.1, $B = \{\alpha | \alpha > 0.1\}$. Karstni tereni sa koeficijentom pražnjenja od 0,12 pripadaju skupu B , dok karstni tereni sa koeficijentom pražnjenja od 0,098 ne pripadaju skupu B . Ovako oštra granica između uključenosti i isključenosti elemenata iz skupa sa heurističkog aspekta je neadekvatna.

Za razliku od klasičnog skupa, fazi skup je bez oštre granice, što se vidi i u značenju ove reči na engleskom jeziku, sa koga se reč „fazi“ može prevesti kao: „neizrazit“, „mekan“, „nejasan“, „zamagljen“, „neodređen“ ili „rasut“. Time je prelaz od „pripada skupu“ ka „ne pripada skupu“ postepen, što je opisano funkcijom pripadnosti, koja daje skupu fleksibilnost pri modeliranju, koristeći uobičajne izraze kao što su: „poroznost je velika“ ili „nivo podzemnih voda je visok“.

Veliki broj skupova sa kojima se eksperti susreću u praksi nema precizno određene granice koje razdvajaju pripadnost elemenata skupa, pa npr. prilikom razmatranja povratka nivoa pri dugotrajnom testu cpenja može se konstatovati da je vreme do ustaljenja nivoa „dugo“. Ako se skup M označi kao skup: „dugo vreme do ustaljenje nivoa podzemnih voda“, logično se nameće pitanje utvrđivanja granica pripadnosti ovako definisanog skupa. Da li skupu pripada vreme ustaljenja od 17 sati? Da li mu pripada i vreme ustaljenja od 25 ili 32 sata? Da li skupu koji se zove „vreme ustaljenja nivoa podzemnih voda je okvirno 24 časa“ pripada i vreme od 22 sata ili vreme od 8 sati? Intuitivno je jasno da je vreme ustaljenja nivoa podzemnih voda od 22 sata „više“ ili „jače“ pripada skupu koji se zove „vreme ustaljenja nivoa podzemnih voda je okvirno 24 časa“, nego što mu pripada vreme ustaljenja od 8 sati. Shodno prethodno iznetom, ima više istine u tvrdnji da je vreme ustaljenja od 22 sata: „vreme ustaljenja nivoa podzemnih voda od okvirno 24 časa“, nego u tvrdnji da je vreme ustaljenja nivoa podzemnih voda 8 sati: „vreme ustaljenja nivoa podzemnih voda od oko 24 časa“.

Zadeh (1965) ističe da neprecizno definisani skupovi, pri čemu je islustrativan prethodni primer, „igraju važnu ulogu u procesu ljudskog razmišljanja, posebno u oblastima prepoznavanja uzoraka, razmeni informacijama i apstrakcijama“.

3.3.1. Funkcija pripadnosti fazi skupa (μ) i njeni oblici

Elementi fazi skupa imaju različite stepene pripadnosti skupu i svaki element pripada nekoj kategoriji (Dubois & Prade, 2000). Skupovi kategorija iste klase u datom trenutku razmatranja čine invarijabilni (univerzalni, konstantni) skup koji se naziva i oblast definisanja (eng. „universe of discourse“).

Kod klasične teorije skupova, ako se posmatra element x iz datog univerzalnog skupa U , on ili pripada ili ne pripada skupu A , koji je podskup univerzalnog skupa U . Pripadnost elementa x skupu A ($x \in U, U \subset A$) opisuje se karakterističnom funkcijom $\mu_A(x)$ koja može da ima vrednosti samo 0 ili 1:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x \notin A \\ 1 & x \in A \end{cases}$$

Na osnovu iznetog se može videti da su granice skupa A oštre i jasne, kao i da predstavljaju dvoklasnu kategorizaciju elemenata univerzalnog skupa U .

Razmatra se fazi skup B , koji je definisan na univerzalnom skupu U i predstavlja podskup univerzalnog skupa U (Dubois & Prade, 2000):

$$B = \{(x, \mu_B(x)) | x \in U\}$$

Za razliku od klasične teorije skupova, fazi skup B je definisan funkcijom pripadnosti (eng. „membership function“) $\mu_B(x)$, koja predstavlja stepen pripadanja elementa x fazi skupu B i može imati vrednosti iz celog intervala:

$$\mu_B(x): U \rightarrow [0,1]$$

Ovo omogućava posmatranje fazi skupa kao proširenje klasičnog (oštrog) skupa, čije funkcije pripadnosti predstavljaju preslikavanje iz skupa U u skup $[0,1]$.

Fazi skup B uvodi neodređenost, poništavanjem oštarih granica između članova skupa i onih koji to nisu. Drugim rečima, prelaz sa članova na „ne-članove“ nije tako oštar, nego je postepen. Vrednost funkcije pripadnosti $\mu_B(x)$ prikazuje stepen pripadanja elementa x ($x \in U$) fazi skupu B . Kako raste vrednost funkcije pripadnosti $\mu_B(x)$, tako je i veća pripadnost elementa x fazi skupu B .

Teorija fazi skupova može se razmatrati kao n -vrednosna logika, gde broj logičkih vrednosti teži beskonačnosti (Dubois & Prade, 2000). Ova teorija se može analizirati i razumeti na znatno kompleksniji način, ako se uzme u obzir da Bool-ova logika koristi samo dve logičke vrednosti, kao i da trovrednosna logika koristi tri logičke vrednosti i da se, konačno, ovaj broj pomera ka beskonačnosti, kada se razmatra fazi skup. U

skladu sa tim, za kompletnu oblast definisanosti U (univerzalni skup koji sadrži sve informacije za razmatrani problem) i njen podskup U_I , stepen pripadnosti elementa x u U_I u zavisnosti od logike, može da primi vrednost u:

- skupu $\{0,1\}$: ako se razmatra Bool-ova logika,
- skupu $\{0,0.5,1\}$: ako se razmatra trovrednosna logika i
- intervalu $[0,1]$: ako se razmatra fazi skup.

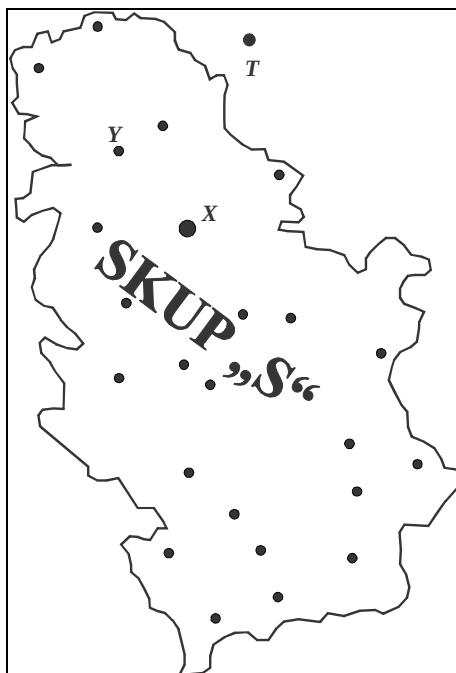
Uzevši u obzir prikazano, može se konstatovati da je fazi skup B okarakterisan funkcijom pripadnosti $\mu_B(x)$, vezujući svaki element x za njegov kompatibilan stepen pripadnosti u skupu B . Stoga je prelaz između dva ekstremna položaja potpune pripadnosti i totalnog nedostatka pripadnosti elementa x fazi skupu B postepen, dok je u klasičnoj teoriji skupova, vezanoj za Bool-ovu logiku, ovaj prelaz nagao (Dubois & Prade, 2000).

U literaturi je moguće pronaći i definicije drugih istraživača koje su slične sa prethodnim definicijama. Na primer, pored Dubois & Prade (1987, 2000), Bezdeck (1981) i Kaufmann & Gupta (1988) definišu fazi skup preko funkcije pripadnosti, a Lena (1985) definiše fazi skup kao „graf“ tj. preko fazi relacije.

Ilustrativno za hidrogeologiju je ako se npr. sa S označi skup svih izvorišta podzemnih voda za vodosnabdevanje gradova u Srbiji. Svako izvoriste pripada skupu S , ukoliko se nalazi na teritoriji Srbije. Tako se pripadnost elemenata x skupa S u klasičnoj teoriji skupova opisuje funkcijom pripadnosti $\mu_S(x)$ na sledeći način:

$$\mu_S(x) = \begin{cases} 1 & \text{ako i samo ako } x \text{ pripada } S \\ 0 & \text{ako i samo ako } x \text{ ne pripada } S \end{cases}$$

Sa slike II-3.4 se očigledno vidi da je $\mu_S(X)=1$, $\mu_S(Y)=1$ i $\mu_S(T)=0$.



Slika II-3.4: Skup „S“ (izvorišta za vodosnabdevanje gradova Srbije) i elementi x , y , t

Na osnovu funkcije pripadnosti (μ), mogu se odrediti neka svojstva fazi skupova (Lilly, 2010):

Prazan fazi skup je onaj ako i samo ako je funkcija pripadnosti jednaka nuli.

Visina fazi skupa je najviša vrednost njegovog stepena pripadnosti, tj. funkcije pripadnosti.

Podrška fazi skupa (eng. „support“) je klasičan i jasan skup elemenata ($x \in U$), takvih da je funkcija pripadnosti $\mu_B(x) > 0$:

$$\text{supp } B = \left\{ (x \in U \mid \mu_B(x) > 0) \right\}$$

Fazi singleton (eng. „fazi singleton“) je fazi skup čija se podrška sastoji od samo jednog elementa univerzalnog skupa U , i pri tome je funkcija pripadnosti $\mu(x) = 1$.

Jezgro fazi skupa (eng. „kernel“) je skup svih elemenata za koje je funkcija pripadnosti $\mu(x) = 1$:

$$\ker B = \left\{ (x \in U \mid \mu_B(x) = 1) \right\}$$

Normalan fazi skup je onaj čija funkcija pripadnosti dostiže vrednost 1 za najmanje jednu tačku u oblasti definisanosti.

Domen fazi skupa. Neka se označi sa $Z = \{z_1, z_2, z_3, \dots, z_n\}$ konačan skup elemenata z_i , gde je $i = 1, 2, \dots, n$. Skup Z takođe može da bude prikazan u obliku:

$$Z = z_1 + z_2 + \dots + z_n = \sum_{i=1}^n z_i$$

Fazi skup A definisan na diskretnim vrednostima domena Z se prikazuje u obliku:

$$A = \frac{\mu_A(z_1)}{z_1} + \frac{\mu_A(z_2)}{z_2} + \dots + \frac{\mu_A(z_n)}{z_n} = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(z_i)}{z_i}$$

U slučaju kada Z nije konačan skup i kada se radi o kontinualnom domenu Z , fazi skup A definisan na skupu Z može se predstaviti kao:

$$A = \int_Z \frac{\mu_A(z)}{z}$$

Na primer, ukoliko se posmatra skup $H = \{1, 3, 5, 7, 9, 10, 15\}$, i elementi ovog skupa označavaju opadanje nivoa podzemnih voda u metrima, koja bi se crpljenjem iz bunara u međuzrnskoj sredini konstantnim kapacitetom od 10 l/s ostvarila za 30 min. Neka se sa F označi fazi skup „depresija nastala za 30 minuta tokom crpenja“ sa njegovim stepenima pripadnosti redom: 0.01, 0.85, 0.95, 0.55, 0.25, 0.1 i 0.01. Fazi skup F može da bude prikazan kao:

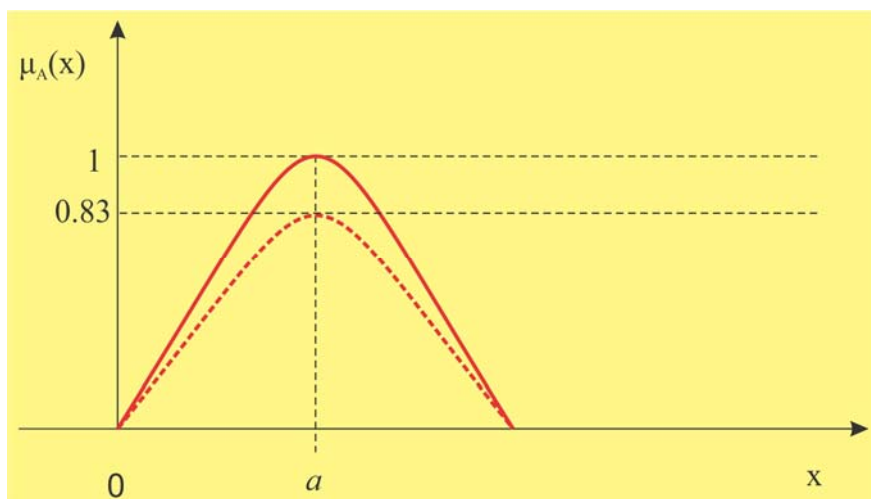
$$F = \frac{0.85}{1} + \frac{0.95}{3} + \frac{0.55}{5} + \frac{0.25}{7} + \frac{0.1}{9} + \frac{0.01}{15}$$

Na prikazanom primeru se jasno vidi da se fazi skupovi definišu preko funkcije pripadnosti pomoću koje se svakom elementu dodeljuje odgovarajući stepen pripadnosti fazi skupu. Funkcija pripadnosti kojom se utvrđuje stepen pripadnosti pojedinih elemenata fazi skupa F mora da zadovolji sledeći uslov (Lilly, 2010):

$$0 \leq \mu_F(x) \leq 1 \quad \forall x \in F$$

Stepeni pripadnosti su subjektivno određeni posle većeg broja pokušaja da se stvori takva funkcionalna zavisnost koja će da generiše njihov opseg u intervalu od 0 do 1, a ukazuju na „jačinu“ pripadnosti pojedinih elemenata fazi skupa F .

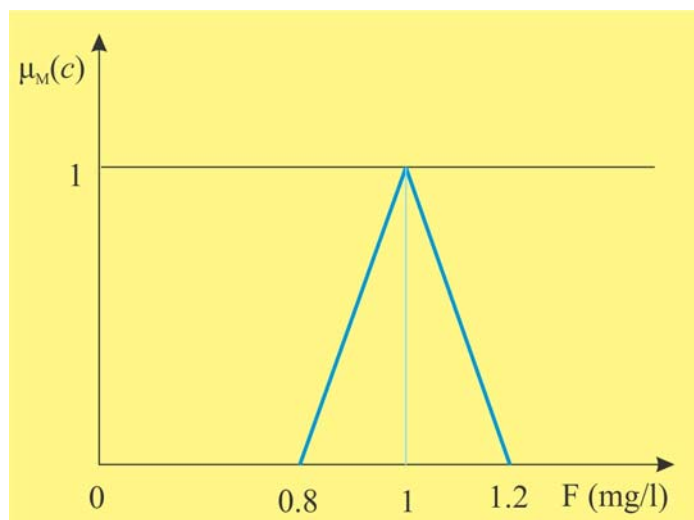
Normalizovani fazi skup je skup u kome za bar jedan element u domenu fazi skupa (dozvoljeni niz vrednosti fazi skupa) postoji bar jedna funkcija pripadnosti koja dostiže vrednost 1. Na sličan način shvaćeno, on nastaje iz fazi skupa koji nije normalizovan sa proporcionalnom promenom vrednosti funkcije pripadnosti, tako da maksimalna vrednost bude 1, kao što je prikazano na slici II-3.5.



Slika II-3.5: Normalizacija fazi skupa „A“

Određivanje funkcije pripadnosti vrši se na osnovu individualnih (subjektivnih) zapažanja nejasne klase ili na osnovu statističke raspodele (Dubois & Prade, 1986).

Neka se posmatra fazi skup M koji se definiše kao „fluorisanje vode za piće se vrši sa oko 1 mg/l fluora“. Funkcija pripadnosti $\mu_M(c)$ koja je subjektivno određena prikazana je na slici II-3.6.



Slika II-3.6: Fazi skup M - „fluorisanje vode za piće se vrši sa ≈ 1 mg/l fluora“ i njena funkcija pripadnosti $\mu_M(c)$

U ovom primeru je procenjeno da se fluorisanje vode za piće vrši flurom u granicama od 0.8-1.2 mg/l (Sl. Gl. RS 6/97, 1997). Ukoliko se subjektivno uzme, fluorisanje sa 1 mg/l sa stepenom pripadnosti 1 pripada fazi skupu „fluorisanje vode za piće se vrši sa oko 1 mg/l fluora“. Ovom skupu pripadaju i sve vrednosti koncentracije fluora u mg/l sa stepenom pripadnosti većim od nule i sve vrednosti koncentracije fluora u mg/l koje se nalaze u intervalu od 0.8-1.2 mg/l. Vrednosti koncentracije fluora van ovog intervala odgovara stepen pripadnosti jednak nuli.

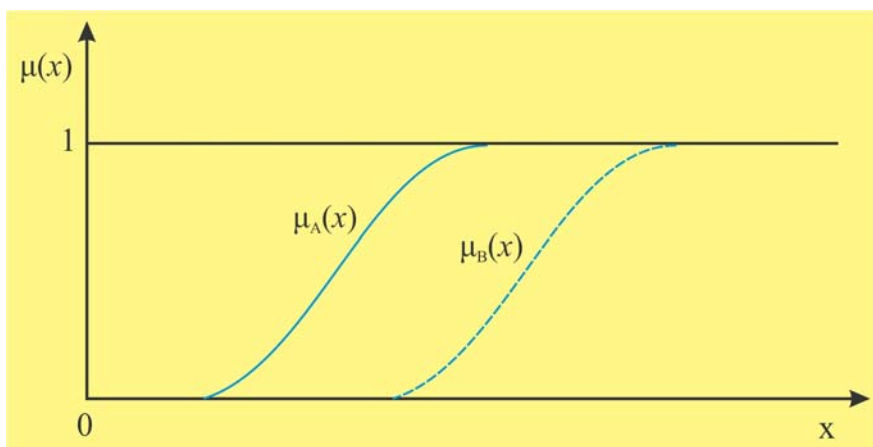
Funkcija pripadnosti nekog fazi broja može u osnovi da ima dva oblika: diskretni i kontinualni oblik (Dubois & Prade, 1986). Što se tiče diskretnog oblika funkcije pripadnosti, svakom elementu fazi broja se pridružuje tačno jedna diskretna vrednost iz

intervala $[0,1]$, a to bi značilo da je diskretna funkcija pripadnosti definisana u obliku vektora sa konačnim brojem parametara. Vrednost stepena pripadnosti svakog elementa fazi skupa se može sračunati preko gustine verovatnoće ili subjektivnim procenama eksperta. Kontinualni oblik funkcije pripadnosti fazi broja definiše se neprekidnim intervalom poverenja.

3.3.2. Osnovni operatori fazi skupova

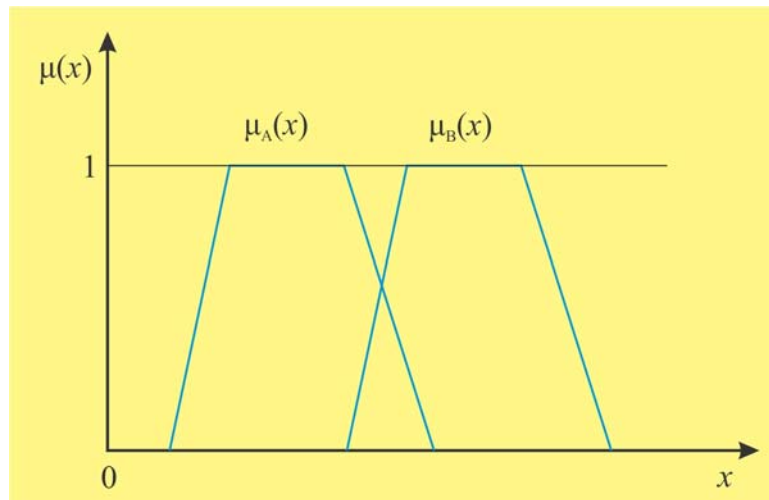
Funkcija pripadnosti $\mu_A(x)$ je fundamentalna komponenta fazi skupa, tako da se nekoliko operacija definiše pomoću relacije koje uzimaju u obzir ovu funkciju. Zadeh (1965) je predložio sledeće definicije: jednakost fazi skupa, podskup fazi skupa, uniju, presek, komplemen fazi skupa, kovneksnost i α -odsečak, koje su dalje prikazane.

Jednakost i podskup fazi skupa. Fazi skupovi A i B definisani na univerzalnom skupu U su jednaki ($A = B$) ako i samo ako su njihove funkcije pripadnosti jednake, $\mu_A(x) = \mu_B(x)$, za sve elemente x skupa U (slika II-3.7). Fazi skup A je podskup fazi skupa B , definisanih na skupu U , ako i samo ako su njihove funkcije pripadnosti $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ za sve elemente x skupa U . Tada se to označava kao ($A \subset B$), gde se znak „ $\subset$ “ zove inkluzija.



Slika II-3.7: Jednakost fazi skupova: funkcije pripadnosti fazi skupova A i B

Unija, presek i komplement fazi skupa. Neka su A i B dva fazi skupa i neka su $\mu_A(x)$ i $\mu_B(x)$ njihove funkcije pripadnosti (slika II-3.8):

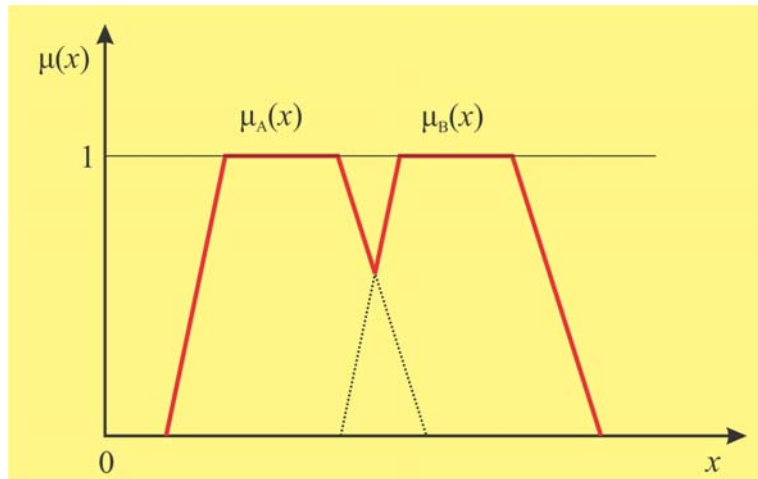


Slika II-3.8: Funkcije pripadnosti fazi skupa A i fazi skupa B

Unija fazi skupova A i B definiše se kao najmanji fazi skup koji istovremeno sadrži i fazi skup A i fazi skup B . Funkcija pripadnosti $\mu_{A \cup B}(x)$ unije $A \cup B$ fazi skupova A i B definiše se na sledeći način:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, \quad x \in X$$

Umesto simbola „max“ može se koristiti i simbol „V“, a unija odgovara operaciji „ili“. Na slici II-3.9 prikazana je funkcija pripadnosti uniji fazi skupova A i B .

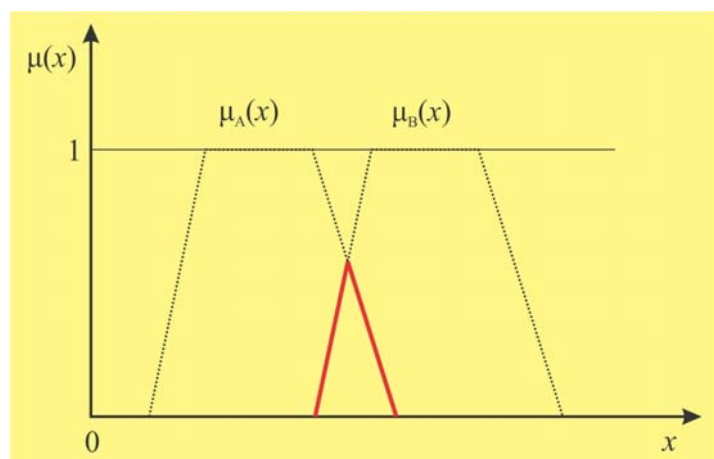


Slika II-3.9: Funkcija pripadnosti uniji fazi skupova - $A \cup B$

Presek fazi skupova A i B definiše se kao najveći fazi skup koji je istovremeno sadržan u fazi skupovima A i B . Funkcija pripadnosti $\mu_{A \cap B}(x)$ preseka $A \cap B$ fazi skupova A i B definiše se na sledeći način:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, \quad x \in X$$

Umesto simbola „min“ može se koristiti i simbol „ $\wedge$ “, a presek odgovara operaciji „i“. Na slici II-3.10 prikazana je funkcija pripadnosti preseku fazi skupova A i B .

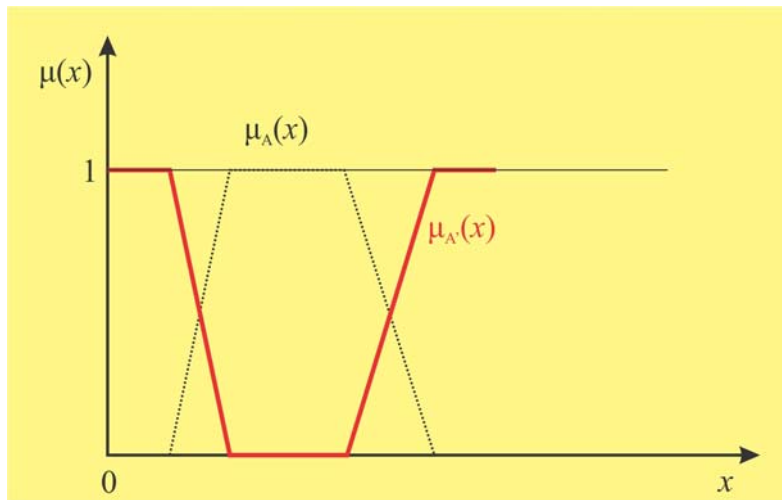


Slika II-3.10: Funkcija pripadnosti preseku fazi skupova - $A \cap B$

Pod komplementom fazi skupa A , čijim elementima odgovaraju stepeni pripadnosti između 0 i 1, podrazumeva se fazi skup A' , čija se funkcija pripadnosti izračunava kao:

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x), \quad x \in X$$

Na slici II-3.11 prikazana je funkcija pripadnosti komplementa fazi skupa „ A “.



Slika II-3.11: Funkcija pripadnosti komplementa fazi skupa „ A “

Ako se posmatraju ponovo fazi skupovi A i B , relacije jednakosti i uključivosti definišu se kao:

- jednakost: $A = B \Leftrightarrow \mu_A(x) = \mu_B(x), \quad \forall x \in X$
- uključivost: $A \supseteq B \Leftrightarrow \mu_A(x) \geq \mu_B(x), \quad \forall x \in X$

Definicije funkcije pripadnosti unije, preseka i komplementa fazi skupova omogućavaju osnovne razlike između klasičnog i fazi skupa. U Bool-ovoj logici važi zakon „nesuprotnosti“ (eng. „non-contradiction“) i zakon srednjeg isključenja (eng. „excluded-middle laws“). Ako se razmatraju izomorfizam između Bool-ove logike i klasične teorije skupa, ova dva zakona moguće je predstaviti pomoću sledećih izraza:

$$A \cap A' = \emptyset$$

$$A \cup A' = U$$

U teoriji fazi skupova ova dva zakona ne važe. Uzimajući u obzir zakon suprotnosti, stepen pripadnosti od x u $A \cap A'$, a prema definiciji funkcije pripadnosti preseka i komplementa fazi skupova, data je sa:

$$\mu_{A \cap A'}(x) = \begin{cases} \mu_{A'}(x), & \mu_{A'}(x) \leq 1 - \mu_{A'}(x) \Leftrightarrow \mu_{A'}(x) \leq 0.5 \quad \forall x \in X \\ 1 - \mu_{A'}(x), & \mu_{A'}(x) \geq 1 - \mu_{A'}(x) \Leftrightarrow \mu_{A'}(x) \geq 0.5 \quad \forall x \in X \end{cases}$$

Na ovaj način je moguće zaključiti da element x može istovremeno imati ne-nulti stepen pripadnosti za fazi skup, kao i za njegov komplement.

Vezano za zakon srednjeg isključenja $A \cap A'$, a prema definiciji funkcije pripadnosti unije i komplementa fazi skupova, stepen pripadnosti od od x u $A \cup A'$ je dat sa:

$$\mu_{A \cup A'}(x) = \begin{cases} \mu_{A'}(x), & \mu_{A'}(x) \geq 1 - \mu_{A'}(x) \Leftrightarrow \mu_{A'}(x) \geq 0.5 \quad \forall x \in X \\ 1 - \mu_{A'}(x), & \mu_{A'}(x) \leq 1 - \mu_{A'}(x) \Leftrightarrow \mu_{A'}(x) \leq 0.5 \quad \forall x \in X \end{cases}$$

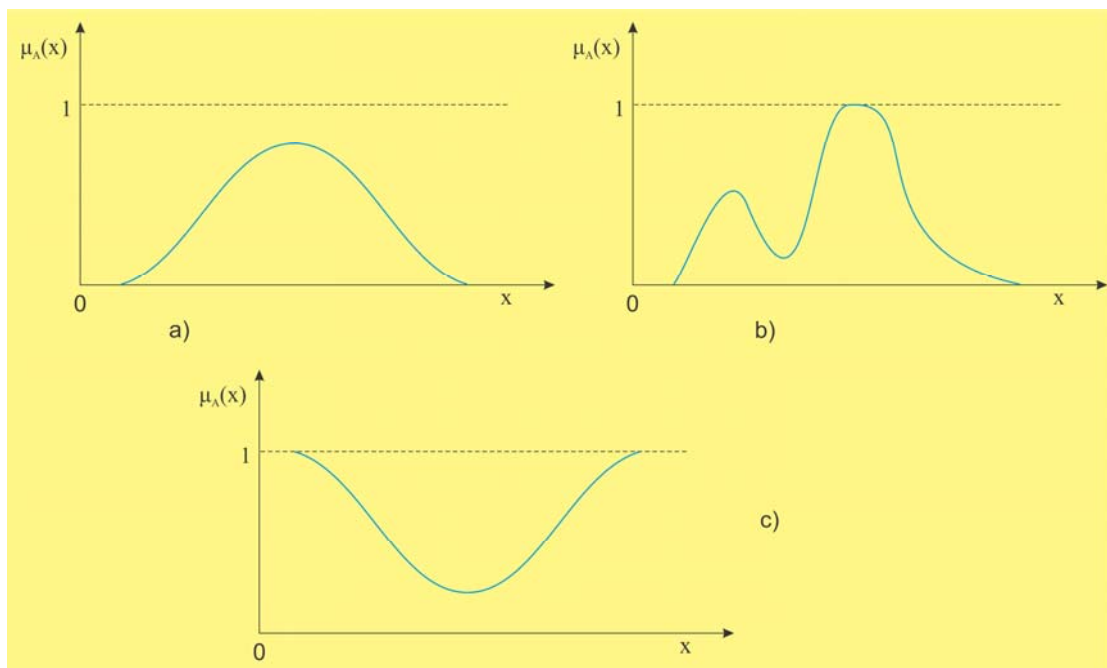
Ovim se definiše da unija fazi skupa sa svojim komplementom za rezultat može da da skup koji nije u oblasti definisanosti X .

Konveksnost i α -odsečak fazi skupa. Definicija konveksnosti fazi skupa se razlikuje od definicije istog termina u klasičnoj teoriji skupova. Konveksnost fazi skupa se ogleda u činjenici da funkcija pripadnosti ne menja smer više od jednog puta, tj. fazi skup A je konveksan ako i samo ako važi sledeći izraz:

$$\forall x_1, x_2 \in X_1 \quad \forall \lambda \in [0, 1] \\ \mu_A(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \min(\mu_A(x_1), \mu_A(x_2))$$

Navedena definicija označava da za svaki par vrednosti x_1 i x_2 , stepen pripadnosti vrednosti x_i , takve da je $x_1 \leq x_2 \leq x_3$, nije manji od manjeg stepena pripadnosti vrednosti x_1 i x_2 u fazi skupu A . Ova relacija se može interpretirati i na sledeći način: uzmu se dva elementa x_1 i x_2 iz fazi skupa A i povuče se duž koja ih spaja. Da bi fazi skup bio konveksan, funkcija pripadnosti za svaku tačku te duži mora biti veća ili jednaka od minimuma vrednosti $\mu_A(x_1)$ i $\mu_A(x_2)$.

Na slici II-3.12 predstavljene su funkcije pripadnosti konveksnog i nekonveksnog fazi skupa. Na slici II-3.12.a funkcija pripadnosti $\mu_A(x)$ je konveksna, ali nije normalizovana, dok je na slici II-3.12.b funkcija pripadnosti $\mu_A(x)$ nekonveksna i normalizovana. Primećuje se da konveksnost fazi skupa ne podrazumeva konveksnost funkcije pripadnosti, što se vidi na slici II-3.12.c .



Slika II-3.12: Funkcije pripadnosti za fazi skupove A : a) konveksna, b) nekonveksna i normalizovana i c) nekonveksna

α -odsečak fazi skupa A je brojčani skup A_α koji obuhvata elemente čija funkcija pripadnosti u fazi skupu A nije manja od α , za $0 \leq \alpha \leq 1$:

$$A_\alpha = \{x_1 \in X_1 : \mu_A(x_1) \geq \alpha\}$$

Skup podrške (eng. „support set“) fazi skupa A je brojčani skup $P(A)$ svih elemenata (x) iz univerzalnog skupa U takvih da funkcija pripadnosti fazi skupa A nije nula.

$$P(A) = \{x \in U : \mu_A(x) > 0\}$$

3.3.3. Fazi relacije

U cilju razumevanja fazi relacija, polaznu osnovu predstavlja definisanje relacije kod klasičnih skupova, kako su opisali Dubois & Prade (1980). Relacija (ρ) u klasičnim skupovima i funkcija pripadnosti $\mu_\rho(a, b)$ je definisana kao:

$$\rho : (\forall a) \in A, (\forall b \in B) : a \rho b$$

$$\mu_\rho(a, b) = \begin{cases} 1 & \text{ako i samo ako } (a, b) \in \rho \\ 0 & \text{ako i samo ako } (a, b) \notin \rho \end{cases}$$

Iz prethodnog izraza se vidi da funkcija pripadnosti elemenata skupa A i B može da uzima samo vrednost 0 ili 1. Kako je već naglašeno, kod fazi skupova ovo mogu biti vrednost iz intervala $[0, 1]$, pa porast vrednost funkcije pripadnosti, proporcionalan je i jačini pripadnosti elemenata fazi skupu.

Definisanjem kartezijanskog proizvoda klasičnih skupova $(A \times B)$:

$$A \times B = \{(a, b) | a \in A, b \in B\}$$

zaključuje se da je relacija (ρ) podskup kartezijanskog proizvoda $A \times B$.

Funkcija pripadnosti $(\mu_{A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n})$ kartezijanskog proizvoda fazi skupova $A_1, A_2, \dots, A_n$ definisanim na univerzalnom skupu U sa elementima $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ bi bila:

$$\mu_{A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \mu_{A_1}(x_1) \wedge \mu_{A_2}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{A_n}(x_n) \text{ tj.}$$

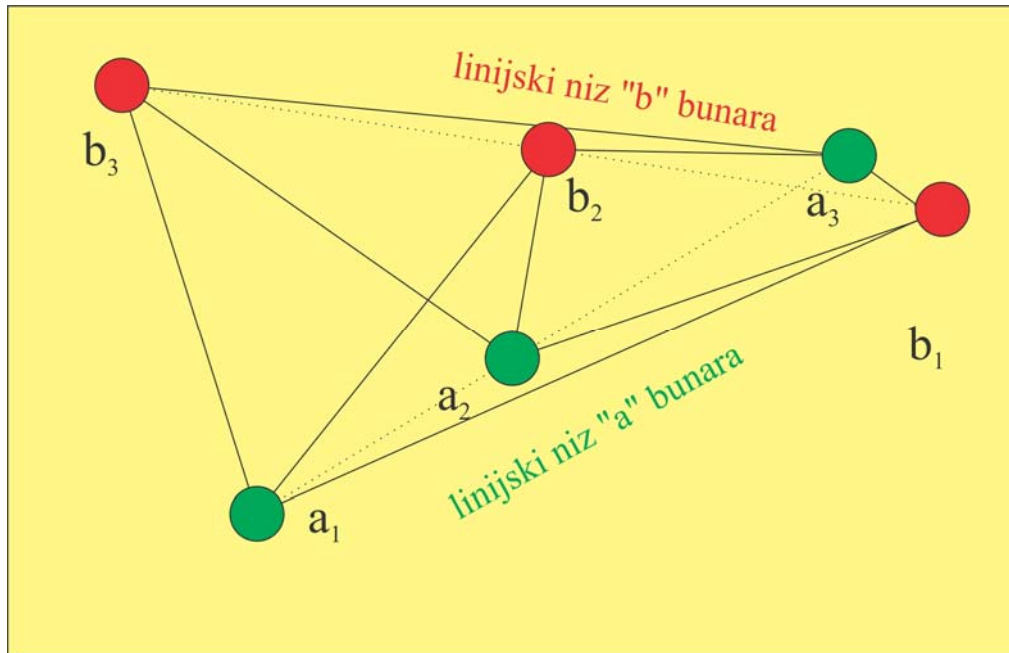
$$\mu_{A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \min(\mu_{A_1}, \mu_{A_2}, \dots, \mu_{A_n})$$

Samim tim, fazi relacija (R) između ovih skupova predstavlja fazi skup definisan na kartezijanskom proizvodu $A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$, pri čemu uređeni parovi pripadaju relaciji R sa stepenom pripadnosti čija je vrednost realan broj u intervalu od 0 do 1 tj. $[0,1]$.

Na primeru skupova A i B , koji predstavljaju linijski niz bunara na u sistemu odobrene od podzemnih voda sa elementima (bunarima) - $A = (a_1, a_2, a_3)$ i $B = (b_1, b_2, b_3)$, ilustrovana je fazi relacija.

Ako relacija R između ovih skupova označava „malo udaljenje između linijskih nizova bunara“, onda bi se ta fazi relacija mogla predstaviti na sledeći način (slika II-3.13):

$$R(A, B) = 0.93 / (a_1 b_1) + 0.6 / (a_1 b_2) + 0.67 / (a_1 b_3) + 0.4 / (a_2 b_1) + \\ + 0.2 / (a_2 b_2) + 0.8 / (a_2 b_3) + 0.15 / (a_3 b_1) + 0.25 / (a_3 b_2) + 0.9 / (a_3 b_3)$$



Slika II-3.13: Fazi relacija „malo udaljenje između bunara različitih linijskih nizova“

Vrednosti funkcije pripadnosti R , koja se odnosi na „malo udaljenje između bunara različitih linijskih nizova“, može se predstaviti i u matricnoj formi:

	a_1	a_2	a_3
b_1	0.93	0.4	0.15
b_2	0.6	0.2	0.25
b_3	0.67	0.8	0.9

Dalje je pokazano značenje „max-min“ kompozicije relacija. Ako se posmatraju fazi skupovi A , B i C i fazi relacije $R_1 = (A, B)$ i $R_2 = (B, C)$, kompozicija ovih relacija $R(A, C)$ se može napisati kao:

$$R(A, C) = R_1(A, B) \circ R_2 = (B, C)$$

Kompozicija $R(A, B, C)$ predstavlja podskup kartezijanskog proizvoda $X \times Z$ takav da je $(x, z) \in R$ ako postoji najmanje jedno $y \in Y, (x, y) \in R_1$ i $(y, z) \in R_2$.

Kod fazi relacija R_1 i R_2 , koje su definisane na kartezijanskim proizvodima $X \times Y$ i $X \times Z$, koristi se „max-min“ kompozicija, kod koje se vrednosti funkcije pripadnosti računaju na sledeći način:

$$\mu_{R_1 \circ R_2}(x, z) = \max_{y \in Y} \min [\mu_{R_1}(x, y), \mu_{R_2}(y, z)]$$

Jedan od osnovnih koncepta fazi skupova je princip proširenja (eng. „extension principle“) koga je definisao Zadeh (1975), a značajan je po tome što se njime mogu proširiti matematički koncepti koji se koriste u radu sa klasičnim skupovima na fazi skupove (Kaufmann & Gupta, 1985).

Ukoliko se posmatra funkcija f kojom se univerzalni skup U preslikava na Z :

$$f: U \rightarrow Z, z = f(u), u \in U, z \in Z$$

gde je Z domen funkcije preslikavanja f , a U je kodomen funkcije f .

Na univerzalnom skupu U , definiše se i fazi skup A . Funkcijom f se fazi skup A preslikava na fazi skup B ($f: A \rightarrow B$), koji je definisan na kodomenu Z . U osnovnom slučaju, pretpostavlja se da je $z \in Z$ skalarna funkcija više promenljivih. Konačno, princip proširenja se definiše na sledeći način: ako je U Dekartov proizvod (D) običnih skupova $U = u_1 \times u_2 \times \dots \times u_n$ i na svakom običnom skupu U_d ($d = \overline{1, D}$) je definisan fazi skup A_d ($d = \overline{1, D}$), preslikavanjem funkcije $f: U \rightarrow Z$ kada je z skalarna funkcija više promenljivih u , tj. $z = f(u_1, u_2, \dots, u_d, \dots, u_D)$ dobija se fazi skup B :

$$B = \{z, \mu_B(z) \mid z = f(u_1, u_2, \dots, u_d, \dots, u_D), (u_1, u_2, \dots, u_d, \dots, u_D) \in U\}$$

Vrednost funkcije pripadnosti fazi skupa B dobija se na sledeći način:

$$\mu_B(z) = \begin{cases} \sup \min(\mu_{A_1}, \dots, \mu_{A_D}) & f^{-1}(z) \neq \emptyset \\ 0 & f^{-1}(z) = \emptyset \end{cases}$$

Kada se različite vrednosti $u \in U$ preslikavaju u samo jednu vrednost $z \in Z$ ($D=1$), tada princip proširenja glasi:

$$\mu_B(z) = \begin{cases} \sup \mu_A(u) & f^{-1}(z) \neq \emptyset \\ 0 & f^{-1}(z) = \emptyset \end{cases}$$

3.4. Fazi brojevi

Fazi broj A je opisan kao normalizovani, konveksan fazi skup definisan na realnoj osi, tako da je njegova funkcija pripadnosti neprekidna po delovima (Kaufmann & Gupta, 1985). Na slici II-3.14 prikazani su fazi skupovi M i N . Pošto fazi skup M nije normalizovan, a fazi skup N nije konveksan, ovi skupovi ne mogu da budu fazi brojevi.

Fazi broj A je pozitivan ili negativan ako važe sledeći izrazi:

$$\mu_A(x) = 0, \quad \forall x \leq 0$$

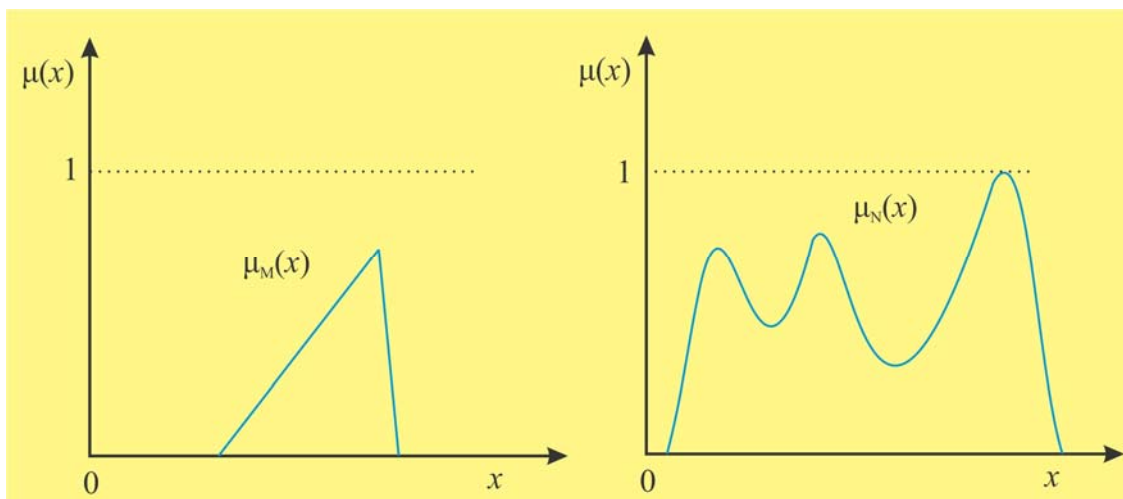
$$\mu_A(x) = 0, \quad \forall x \geq 0;$$

Broj A nije negativan ako važi:

$$\mu_A(x) = 0, \quad \forall x < 0$$

i broj A nije pozitivan ako važi:

$$\mu_A(x) = 0, \quad \forall x > 0.$$



Slika II-3.14: Funkcije pripadnosti za fazi skupove „ M “ i „ N “, koji ne mogu da budu fazi brojevi

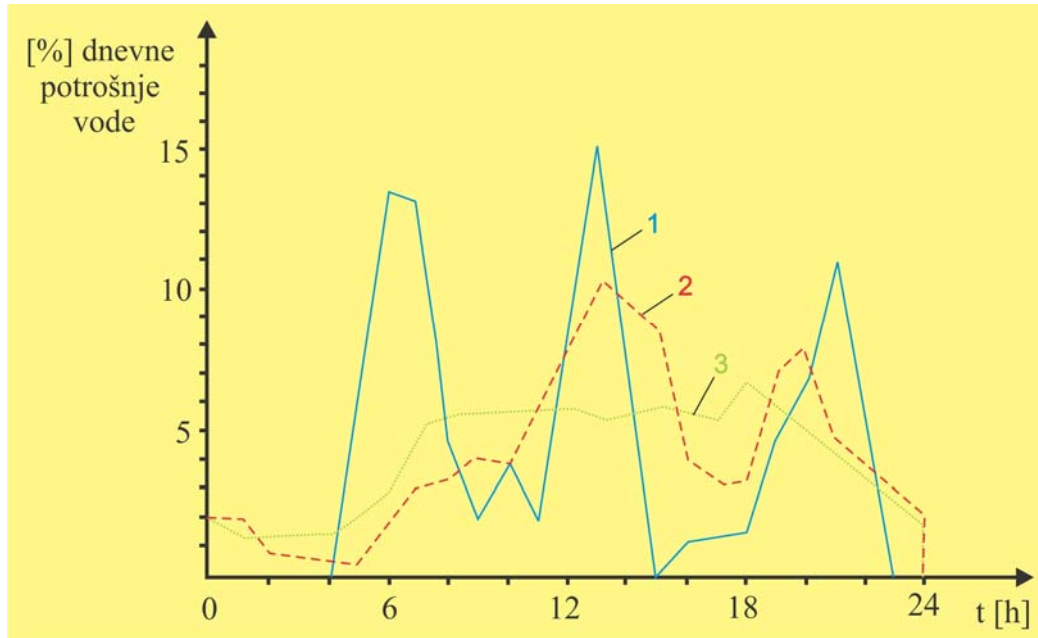
Problemom fazi brojeva najpre su se bavili Kaufmann i Gupta (1985) koji fazi brojeve tretiraju kao „uopštenje koncepta intervala poverenja“. Pored intervala poverenja, fazi broj je opisan još i stepenom uverenosti, što se može ilustrovati primerom:

Neka se pretpostavi postojanje neizvesnosti u pogledu putovanja čestice zagađujuće supstance između dve tačke u poroznoj sredini, kao i da vreme putovanja nije manje od t_1 i nije veće od t_2 . To znači da vreme putovanja te zagađujuće supstance pripada zatvorenom intervalu $[t_1, t_2]$, koji se naziva interval poverenja:

$$T = [t_1, t_2].$$

Kako je naglašeno, pored intervala poverenja, fazi broj se opisuje i stepenom uverenosti. Ilustrativno je ukoliko se pretpostavi da je sigurno da će procenat dnevne potrošnje vode u jednom naselju (slika II-3.15) u 7 h biti 10 %, tada će se ovakvoj situaciji dodeliti stepen uverenosti u vrednosti 1. Može se proceniti da će procenat dnevne potrošnje vode u 7 h biti između 8-15%, a ovoj situaciji će se dodeliti stepen

uverenosti 0. Proceni da će potrošnja vode u naselju u 7 h biti između 9-11% može se dodeliti stepen uverenosti u vrednosti od 0.75.



Slika II-3.16: Varijacija potrošnje vode tokom dana

1 - manje naselje, 2 - veći grad bez industrije, 3 - veći grad s industrijom

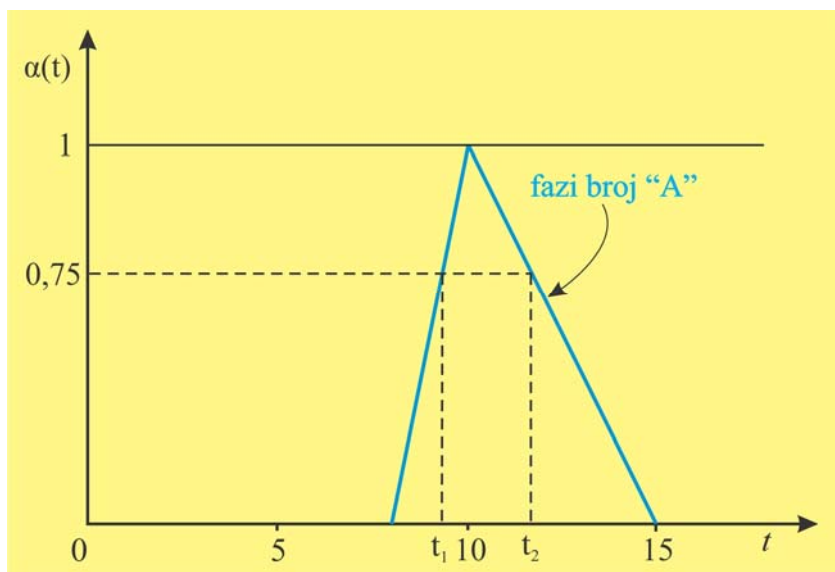
Vodeći se prikazanim primerom, mogu da se izraze i intervali poverenja, a pri tome je svaki okarakterisan stepenom uverenosti:

$$[8,15] \quad \alpha = 0$$

$$[9,11] \quad \alpha = 0.75$$

$$[10,10] \quad \alpha = 1$$

Na slici II-3.16 prikazan je fazi broj A iz prethodnog primera, sa intervalima poverenja kojima odgovaraju stepeni uverenosti $[t_1^\alpha, t_2^\alpha]$.



Slika II-3.16: Fazi broj „A“ sa intervalom poverenja i stepenom uverenosti

Između nekoliko tipova fazi brojeva, dalje su opisani najčešće primenjivani fazi brojevi: trougaoni, trapezoidni, Gauss-ovi, L-R i „flat“ (FFN) fazi brojevi (McNeill & Thro, 1994; Klir & Yuan, 1995).

Trougaoni fazi brojevi. U pogledu primenljivosti, trougaoni fazi brojevi imaju najveću primenu u nauci i inženjerstvu. Koriste se kako u prirodnim tako i u društvenim naukama, posebno u menadžmentu kod donošenja odluke (Chang & Chen, 1994; Lootsma, 1997; Buckley et al., 2002; Ross, 2004; Haans, 2005).

Naziv trougaoni fazi broj potiče od oblika funkcije pripadnosti ovih brojeva (slika II-3.17). Kod trougaonog fazi broja, koji se izražava u obliku $A = (l, s, d)$, ona se može prikazati na sledeći način:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{s-l} & \forall x \in [l, s] \\ \frac{d-x}{d-s} & \forall x \in [s, d] \\ 0 & \forall x \notin [l, d] \text{ tj. } \forall x \in (-\infty, l] \cup [d, \infty) \\ 1 & x = l \end{cases}$$

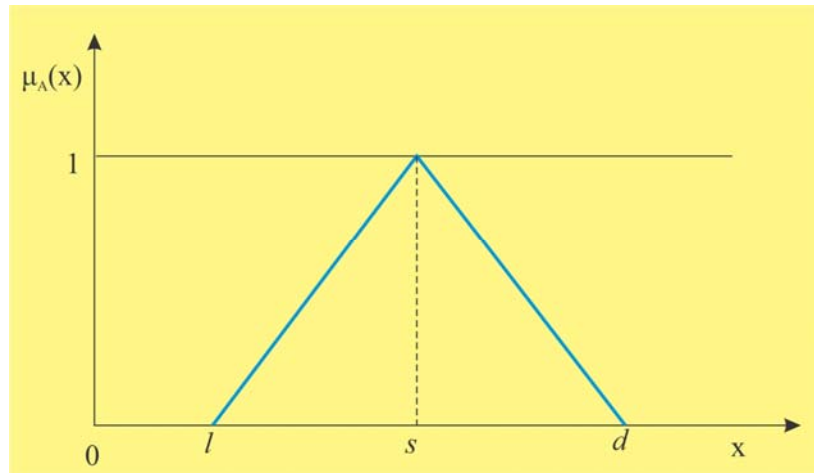
l , s i d predstavljaju realne brojeve koji zadovoljavaju uslov da je $l > 0$ i $l \leq s \leq d$. Kada je $d - l = 0$, vrednost s nije fazi broj, a ako je $d - s = s - l$, trougaoni fazi broj je simetričan.

Njegov α -odsečak je definisan izrazom:

$$A_\alpha = [l + \alpha(s - l), d + \alpha(s - d)] \quad \alpha \in [0, 1]$$

Kako se trougaoni fazi brojevi najviše koriste u praksi, bitnu ulogu igra njegova defazifikacija, što znači da se umesto fazi vrednosti dobija klasična vrednost, tj. realan broj. Defazifikacija se najčešće vrši metodom „centar gravitacije“ (Van Broekhoven, 2004):

$$\text{defuzzy}(A) = \frac{(d - l) + (s - l)}{3} + l$$



Slika II-3.17: Funkcija pripadnosti trougaonog fazi broja

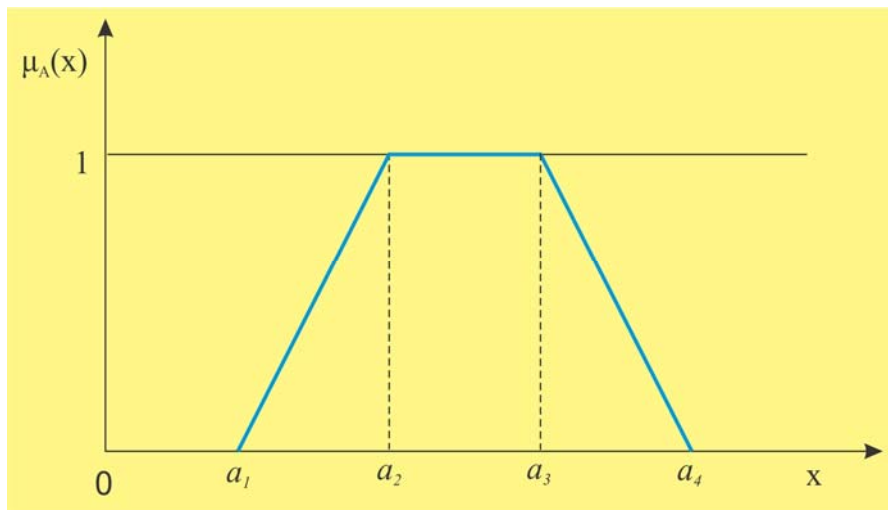
Trapezoidni fazi brojevi. Ako se razmatra trapezoidni fazi broj $A = (a_1, a_2, a_3, a_4)$, funkcija pripadnosti (slika II-3.18) se može prikazati izrazom:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} & x \in [a_1, a_2] \\ 1 & x \in [a_2, a_3] \\ \frac{x-a_4}{a_3-a_4} & x \in [a_3, a_4] \\ 0 & x \notin [a_1, a_4] \end{cases}$$

Njegov α -odsečak je definisan izrazom:

$$A_\alpha = [a_1 + \alpha(a_2 - a_1), a_4 + \alpha(a_3 - a_4)] \quad \alpha \in [0, 1]$$

Trapezoidni fazi broj $A = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ predstavlja poseban slučaj trouganog i prelazi u trougaoni ako je $a_1 = a_3$. Ako je $a_1 = a_2$ i $a_3 = a_4$, tada trapezoidni fazi broj prelazi u pravougaoni, odnosno klasični skup.



Slika II-3.18: Funkcija pripadnosti trapezoidnog fazi broja

LR i FFN fazi brojevi. Prvi tip fazi broja koji su predložili Dubois i Prade (1979) nazvan je LR fazi broj (eng. „Left-Right fuzzy number“). Njegove funkcije imaju sledeće osobine:

- simetrične su u odnosu na nulu, $f(x) = -f(x)$,
- za nulu imaju vrednost jednaku jedinici, $f(0) = 1$ i
- opadajuće su funkcije u intervalu $[0, +\infty]$.

Funkcija pripadnosti LR fazi broja, $A = (m, \alpha, \beta)_{LR}$, definisana je sa dve funkcije (L i R):

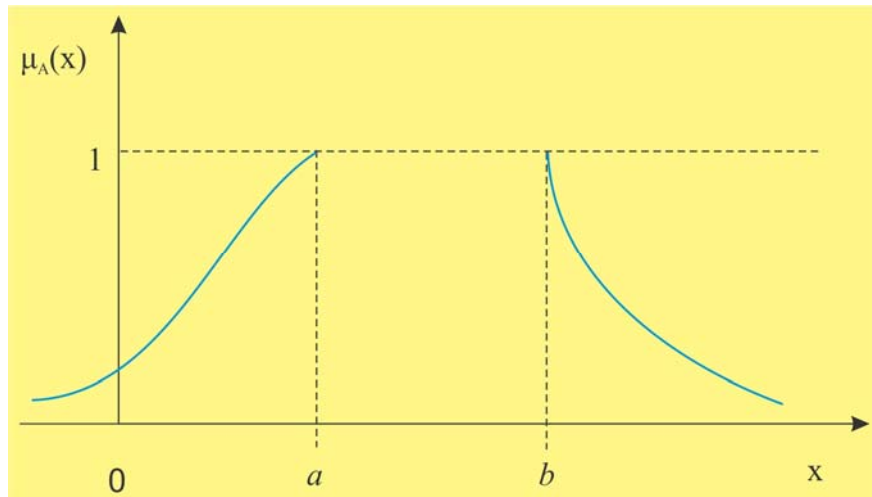
$$\mu_A(x) = \begin{cases} L\left(\frac{m-x}{\alpha}\right), & x \leq m, \alpha > 0 \\ R\left(\frac{x-m}{\beta}\right), & x \geq m, \beta > 0 \end{cases}$$

Funkcije L i R predstavljaju referentne funkcije vezane za levu (L) i desnu (R) granu fazi broja. Srednja vrednost m je veličina za koju je vrednost funkcije pripadnosti jednaka 1, a veličine α i β su leva i desna margina (eng. „left and right spreads“). Kada su ove margine jednake nuli, tada fazi broj prelazi u klasičnu (numeričku) vrednost ukoliko veličine α i β teže beskonačnosti, tada fazi broj prelazi celu realnu osu:

$$\alpha, \beta = +\infty \Rightarrow \mu(m) = 1, x \leq m$$

Drugi tip fazi broja, „FFN“ fazi broj (eng. „flat fuzzy number“), $A = (a, b, \alpha, \beta)_{LR}$ je definisan sledećom funkcijom pripadnosti (slika II-3.19):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} L\left(\frac{a-x}{\alpha}\right) & x \leq a \\ 1 & a \leq x \leq b \\ R\left(\frac{x-b}{\beta}\right) & x \geq b \end{cases}$$



Slika II-3.19: Funkcija pripadnosti „Flat“ fazi broja

Gauss-ov fazi broj. Ako se razmatra Gauss-ov fazi broj A , funkcija pripadnosti data je izrazom:

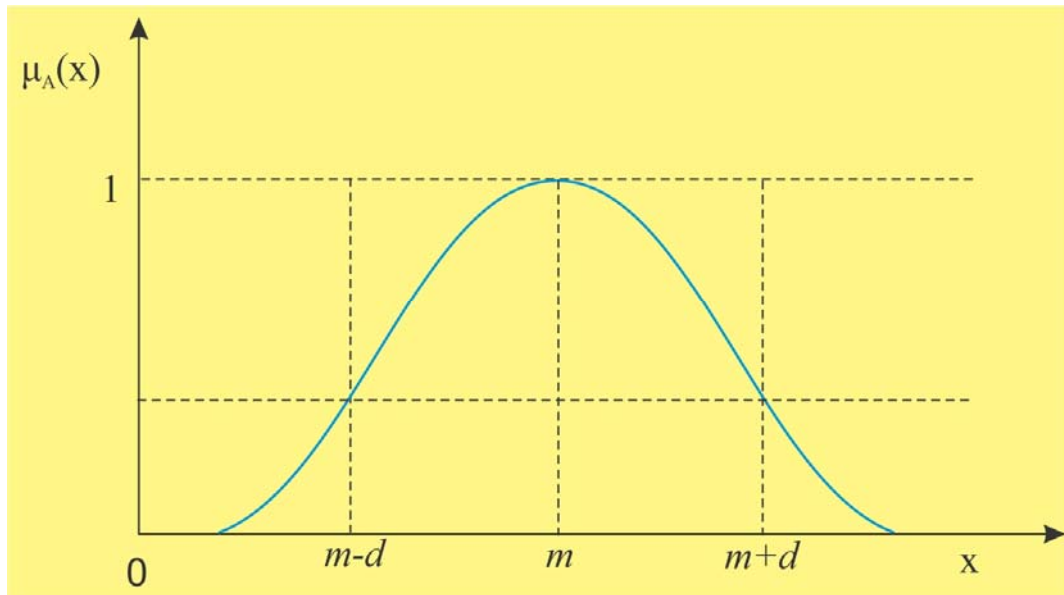
$$\mu_A(x) = e^{-\left(\frac{x-m}{d}\right)^2}$$

Njegov α -odsečak je definisan izrazom:

$$A_\alpha = \left[m - d\sqrt{-\log_e \alpha}, m + d\sqrt{-\log_e \alpha} \right]$$

Parametar funkcije m odgovara tački u odnosu na koju je funkcija simetrična, dok d predstavlja širinu funkcije pripadnosti. Njegova vrednost je uvek pozitivna. Na slici II-3.20 dat je prikaz Gauss-ovog fazi broja. Gauss-ov fazi broj je poseban slučaj LR fazi broja, gde je $\alpha = \beta = d$, a L i R su funkcije date kao:

$$L(x) = R(x) = e^{-x^2}$$



Slika II-3.20: Funkcija pripadnosti Gauss-ovog fazi broja

3.5. Aritmetički operatori fazi brojeva

U ovom poglavlju definisani su postupci proširenja fazi brojeva operacijama sa jednim operatorom, a to su: množenje realnim brojem, recipročna vrednost fazi broja, apsolutna vrednost fazi broja (Ross, 2004) i operacije sa binarnim operatorima: sabiranje, oduzimanje, množenje i deljenje (Teodorović, 1991).

3.5.1. Operacije sa jednim operatorom

Posmatra se fazi broj A i njegova funkciju pripadnosti $\mu_A(x)$. Operacije množenja fazi broja sa realnim brojem r , recipročna vrednost fazi broja i apsolutna vrednost definisane su sledećim izrazima:

$$\mu_{rA} = \mu_A\left(\frac{x}{r}\right), \quad \forall r \neq 0$$

$$\mu_{A^{-1}} = \mu_A\left(\frac{1}{x}\right), \quad \forall x \neq 0$$

$$\mu_{|A|}(y) = \begin{cases} \max(\mu_A(x), \mu_A(-x)), & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

Na osnovu toga, može se zaključiti sledeće:

- proizvod fazi broja A sa realnim brojem r je distributivan u pogledu sabiranja fazi brojeva:

$$r(A_1 \oplus A_2) = (rA_1) \oplus (rA_2)$$

Međutim, osobina distributivnosti proizvoda fazi broja A sa realnim brojem r u pogledu sabiranja realnih brojeva ne važi:

$$A(r_1 + r_2) = (r_1 A) \oplus (r_2 A)$$

- ako fazi broj A nije pozitivan, tada rezultati deljenja 1 sa A nije konveksan, tj. nije fazi broj
- fazi broj vezan za apsolutnu vrednost vrednosti A nije negativan.

3.5.2. Binarne operacije

Sabiranje fazi brojeva. U slučaju fazi brojeva svakom intervalu poverenja odgovara neka vrednost stepena uverenosti, pa se prilikom sabiranja vrši sabiranje intervala poverenja sa istom vrednošću stepena uverenosti. Sabiranje se vrši za svaku od vrednosti stepena uverenosti. Ako se sa A i B označe fazi brojeve koje treba sabrati, a sa $A_\alpha = [a_1, a_2]$ i $B_\alpha = [b_1, b_2]$ njihovi intervali poverenja kojima odgovaraju stepeni uverenosti α , tada je:

$$A_\alpha + B_\alpha = [a_1^\alpha, a_2^\alpha] + [b_1^\alpha, b_2^\alpha] = [a_1^\alpha + b_1^\alpha, a_2^\alpha + b_2^\alpha]$$

Oduzimanje fazi brojeva. Prilikom oduzimanja fazi brojeva vrši se oduzimanje intervala poverenja sa istom vrednošću stepena uverenosti. To se radi tako što se najveća vrednost umanjioaca oduzima od najmanje vrednosti umanjenika, tj. najmanja vrednost umanjioaca se oduzima od najveće vrednosti umanjenika.

Ako se sa A i B označe fazi brojevi koje treba oduzeti, a sa $A_\alpha = [a_1, a_2]$ i $B_\alpha = [b_1, b_2]$ njihovi intervali poverenja kojima odgovaraju stepeni uverenosti α , tada je:

$$A_\alpha - B_\alpha = [a_1^\alpha, a_2^\alpha] - [b_1^\alpha, b_2^\alpha] = [a_1^\alpha - b_2^\alpha, a_2^\alpha - b_1^\alpha]$$

Množenje i deljenje fazi brojeva. Ako se sa A i B označe fazi brojevi koje treba pomnožiti ili podeliti, a sa $A_\alpha = [a_1, a_2]$ i $B_\alpha = [b_1, b_2]$ njihovi intervali poverenja kojima odgovaraju stepeni uverenosti α , tada je:

$$A_\alpha \cdot B_\alpha = [a_1^\alpha, a_2^\alpha] \cdot [b_1^\alpha, b_2^\alpha] = [a_1^\alpha \cdot b_1^\alpha, a_2^\alpha \cdot b_2^\alpha]$$

$$\frac{A_\alpha}{B_\alpha} = \frac{[a_1^\alpha, a_2^\alpha]}{[b_1^\alpha, b_2^\alpha]} = \left[\frac{a_1^\alpha}{b_2^\alpha}, \frac{a_2^\alpha}{b_1^\alpha} \right]$$

Množenje fazi broja konstantom vrši na sledeći način: ako se posmatra fazi broj A u skupu R i konstanta $C \in R_0^+$, gde je $A_\alpha = [a_1, a_2]$ interval poverenja kojima odgovara stepen uverenosti α , tada se proizvod konstante C i intervala poverenja A_α prikazuje kao:

$$cA_\alpha = [c, c] \cdot [a_1^\alpha, a_2^\alpha] = [ca_1^\alpha, ca_2^\alpha]$$

To se može prikazati i preko funkcije pripadnosti:

$$\mu_c A(a) = \mu A\left(\frac{a}{c}\right) \quad \forall a \in R$$

3.6. Primena fazi logike u geostatistici - fazi kriging

Kriging je geostatistička metoda interpolacije, koja je zbog pouzdanih procena prostorno distribuiranih varijabli („slučajnih varijabli“) u tačkama odabrane mreže, našla primenu u različitim granama naučnih istraživanja (Jensen et. al, 1997; de Smith et al., 2007). Kriging je svrstan među najbolje statističke interpolacijske tehnike (Malvić, 2008). U geologiji i hidrogeologiji slučajna varijabla (promenljiva) može predstavljati debljinu sedimenata, poroznost, pritisak i slično. U ovom slučaju, prikazan je postupak procene koeficijenta filtracije. Pod pojmom „slučajna“ misli se na dobijene vrednosti te promenljive prema funkciji normalne ili uniformne raspodele. Metoda „kriging“ je dobila ime po njenom osnivaču Krige-u (1951), koji je prvi primenio tu metodu u proceni koncentracije rude u ležištima zlata.

Primena metode kriginga i procene koje se rade ovom metodom moraju zadovoljiti određene kriterijume. Prema tome, razlike između stvarnih (izmerenih) vrednosti i procenjenih vrednosti moraju biti minimalne u odbranim tzv. „kontrolnim“ ili „ulaznim“ tačkama. Algoritmi programa kriginga imaju mogućnost računanja takvih odstupanja i određivanja greške, a samim tim određivanja kvaliteta procene dobijene krigingom.

Kada se vrši procena vrednosti krigingom, svakom podatku se dodeljuje težinski koeficijent „ λ “, kojim je procenjen njegov uticaj na ukupan proračun. Odnosi između postojećih vrednosti i tačke u kojoj se ona procenjuje izražavaju se vrednostima kovarijanse ili variograma. Ovim postupkom, određuju se zavisnosti i uticaji pojedinih koordinata tačaka na njenu udaljenost od tačke čija se vrednost procenjuje.

Osnovne zakonitosti kojima su definisane jednačine kriginga su sledeće (Cressie, 1993):

- veličina i oblik područja (broj tačaka u mreži) za koje se radi procena vrednosti određeni su izrazom $C(Z_k, Z_k)$, tj. kovarijansom između vrednosti izračunate krigingom sa samom sobom,

- udaljenost između tačke koja se procenjuje (k) i kontrolne tačke (i) određena je kovarijansom $C(Z_k, Z_i)$,
- raspored i međusobna udaljenost dve kontrolne tačke (i) i (j) predstavljena je vrednošću kovarijanse $C(Z_i, Z_j)$ i
- kvaliteta procene težinskih koeficijenata zavisi od napravljenog variogramskog modela, što je, po pravilu, model s većim brojem kontrolnih tačaka, većim dosegom, manjim odstupanjem i bez anizotropije imaće puno veću pouzdanost kod procene težinskih koeficijenata.

Prema pomenutim zakonitostima, primećuje se da su međusobni odnosi između kontrolnih tačaka i tačaka procene definisani preko kovarijanse. Pored kovarijanse, upotrebljavaju se i semivariogramske linije kojima se takođe može definisati prostorna zavisnost podataka. Svakako, za oba slučaja težinski koeficijenti vezani za pojedinu lokaciju postaju samo mera njene udaljenosti od tačke procene, a ne i stvarne vrednosti podatka na toj lokaciji.

Povećanje vrednosti kovarijanse ili semivariograma ukazuje na pouzdanosti procene, tj. veća vrednost dobijena za neki par pokazuje da je i međusobni uticaj tih tačaka veći, a kvalitetnija procena dobija se što pravilnijim rasporedom kontrolnih tačaka.

Princip rada kriginga bazira se na proceni vrednosti slučajne varijable na odabranoj lokaciji Z_k , a temelji se na postojeće okolne vrednosti $-Z_i$. Svako od tih postojećih vrednosti pridružen je odgovarajući težinski koeficijent λ_i , a način njihovog proračuna je najzahtevniji deo algoritma kriginga.

Ako posmatramo procenu koeficijenta filtracije, vrednost slučajne hidrogeološke varijable se definiše na sledeći način:

$$Z_i = Z(x_i)$$

gde x_i predstavlja izmerenu vrednost koeficijenta filtracije.

Vrednost varijable procenjene krigingom na temelju „n“ okolnih tačaka je:

$$Z_k = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times Z_i$$

gde su: λ_i - težinski koeficijenti za svaku lokaciju; Z_i - kontrolne tačke (poznate vrednosti koeficijanta filtracije) i Z_k - vrednosti koeficijanta filtracije procenjene krigingom.

Sledeći korak proračuna putem metode kriginga usmeren je na procenu odgovarajućih težinskih koeficijenata, a na kraju na procenu same vrednosti Z_k . Do tih vrednosti se dolazi rešavanjem linearnih jednačina kriginga (Cressie, 1993), koje se danas vrši pomoću softvera. Kriging kao metoda sadrži više tehnika, a samim tim i jednačine kriginga se razlikuju. Najprimenljivije tehnike kriginga su sledeće (Cressie, 1993):

- jednostavni kriging (eng. „simple kriging“),
- obični kriging (eng. „ordinary kriging“),
- indikatorski kriging (eng. „indicator kriging“),
- univerzalni kriging (eng. „universal kriging“) i
- disjunktivni kriging (eng. „disjunctive kriging“).

Kriging često ima ograničenja, zbog nedovoljne količine ulaznih podataka, dok je broj dostupnih izmerenih podataka neretko suviše nizak, a samim tim je loša variogramska analiza, od koje se koriste podaci za kriging. U takvom slučaju, nedovoljan broj podataka se može dopuniti dodatnim, subjektivno procenjenim od strane eksperta. **Za ovakve slučajeve koristi se kombinacija kriginga i fazi logike, tj. metoda fazi kriginga.**

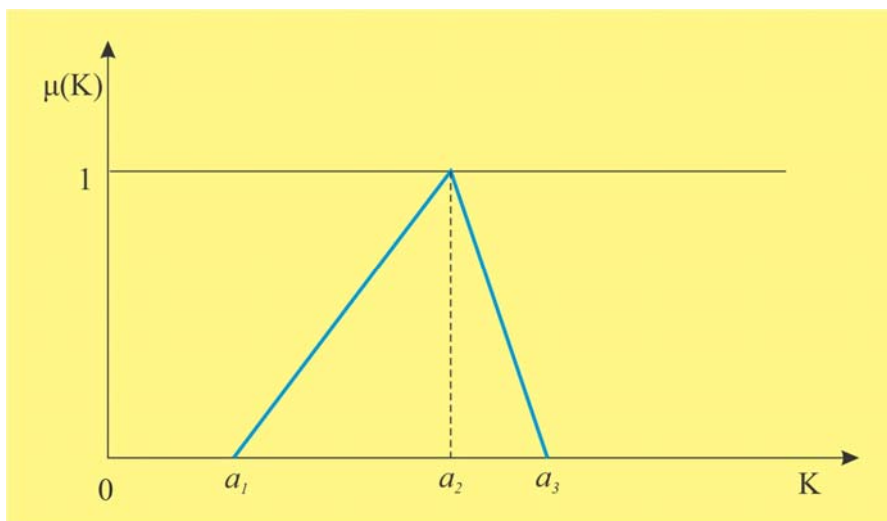
Fazi kriging predstavlja modifikaciju konvencionalne kriging tehnike koji koristi tačne (merene) podatke kao i neprecizne procene podataka dobijene od strane eksperta (Bardossy, 1988).

Za rukovanje nepreciznim i neizvesnim procenama koristi se pristup fazi logike (Zadeh, 1965). Ovakav postupak se koristi za izračunavanje interpolovanih vrednosti fazi brojeva, što je odraz nepreciznosti ulaznih podataka, kao i kvantifikovanje procene neizvesnosti.

Heterogenost često prouzrokuje teškoće u prostornoj interpolaciji geoloških i hidrogeoloških podataka, dobijenih iz bušotina i bunara, ili njihovim određivanjem i merenjem na neki drugi način. Jedan od načina poboljšanja kvaliteta interpolacije je da se izrazi „znanje“ u obliku subjektivnih procena traženog parametra (koeficijenta filtracije) na mestima gde je raspored hidrogeoloških objekata oskudan, a ovakve procene se izražavaju fazi brojevima. Fazi broj predstavlja fazi skup sa konveksnom funkcijom pripadnosti, što podrazumeva maksimalnu vrednost „1“ za samo za jednu vrednost parametra koji se procenjuje, u ovom slučaju koeficijenta filtracije. Kod metode fazi kriginga, u ovom slučaju primenjen je trougaoni fazi broj koji je definisan sa tri vrednosti hidrogeološkog parametra koji se procenjuje (slika II-3.21):

- najverovatnija vrednost hidrogeološkog parametra, gde funkcija pripadnosti ima vrednost „1“ za taj parametar (a_2 na slici II-3.21),
- najviša moguća vrednost hidrogeološkog parametra koji se procenjuje (a_3 na slici II-3.21) i
- najniža moguća vrednost hidrogeološkog parametra (a_1 na slici II-3.21).

Sve tri vrednosti hidrogeološkog parametra subjektivno se definišu od strane eksperta. Najviša i najniža moguća vrednost hidrogeološkog parametra definiše skup podrške (interval mogućih vrednosti) fazi broja. Oblik funkcije pripadnosti ne mora da bude simetričan, a funkcija pripadnosti ima vrednost „0“ za sve što je van fazi skupa podrške.



Slika II-3.21: Funkcija pripadnosti trougaonog fazi broja „koeficijent filtracije“

Primena fazi kriginga u geologiji i hidrogeologiji ima široku primenu, te su naučnici predstavili sledeća istraživanja:

- geostatistička regionalizacija debljine slojeva (Piotrowski et al., 1996b),
- procena hidrogeoloških parametara za potrebe modeliranja podzemnih voda pomoću fazi geostatistike (Piotrowski et al., 1996a),
- fazi kriging model nepreciznih granica tla (Sunila et al., 2004),
- procena rudnih rezervi korišćenjem fazi kriginga (Taboada et al., 2004),
- procena koeficijenta vodoprovodnosti korišćenjem fazi kriginga (Khologhi & Hosseini, 2006),
- fazi „surface“ modeli bazirani na krigingu (Caha et al., 2012),
- prostorna procena kvalitativnih parametara tla (Patriche et al., 2012) i
- analiza podataka teksture tla korišćenjem fazi logike i geostatističkih metoda (Ahmed, 2015).

Struktura kriginga sa fazi brojevima prikazana je na slici II-3.22 (Bardossy et al., 1988; Bardossy et al., 1989). Ako se vrši procena hidrogeološkog parametra, kao što je koeficijent filtracije, kriging je zasnovan na teoretskom variogramu, koji opisuje prostorni raspored koeficijenta filtracije koji se procenjuje. Eksperimentalni variogram sa ulaznim podacima se koristi kao statističko sredstvo, kako bi se napravio teoretski

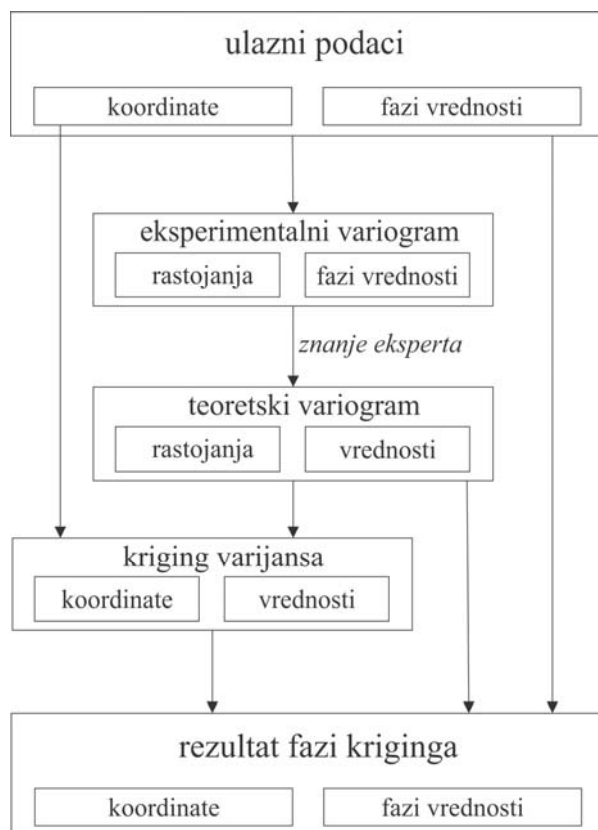
variogram. Na osnovu teoretskog variograma, interpolacija vrednosti u okviru cele mreže (prostora) se vrši minimiziranjem kriging varijansi.

Fazi podaci (slika II-3.22) ulaze u proces proračuna u dve etape. U prvoj etapi, fazi eksperimentalni variogram je napravljen od ulaznih podataka od kojih su neki neprecizni, pored izmerenih podataka. Ekspert uzima u obzir fazi vrednosti eksperimentalnog variograma prilikom određivanja teoretskog variograma. U drugoj etapi, na kraju finalnog koraka kriging proračuna, ulazne fazi vrednosti se ponovo koriste. To dovodi do krajnjeg rezultata prema metodi fazi kriginga, čije su vrednosti takođe fazi brojevi. Treba dodati još i to da kriging varijanse ne zavise direktno od ulaznih vrednosti, nego jedino zavise od prostornog rasporeda ulaznih podataka na teoretskom variogramu. Takođe, teoretski variogram predstavljen je normalnim, ne-fazi brojevima sa tačnim koordinatama, gde je i kriging varijansa normalni, ne-fazi broj.

Fazi krigingom se mogu regulisati kriging varijanse, poštujući prostorni raspored tačaka koje sadrže podatke. Na taj način, ekspert može izmeniti tačke sa visokom vrednošću varijanse na osnovu svog znanja i predstaviti ih fazi brojem. Zbog toga, **znanje eksperta igra veoma važnu ulogu kod primene ove metode.**

Detaljne matematičke jednačine fazi kriginga opisane su od strane nekoliko naučnika: Bardossy, 1988; Bardossy et al., 1988; Bardossy et al., 1989; Bardossy et al., 1990a; Bardossy et al., 1990b; Diamond, 1989; Bandemera & Gebhardt, 2000. Za proračune i procenu hidrogeoloških parametara koristi se softver koji poseduje algoritam fazi kriginga, a za procenu koeficijenta filtracije u doktorskoj disertaciji korišćen je softver „FUZZEKS“ (Bartels, 1996). Ovaj softver kombinuje obe vrste podataka u jedinstvenoj formi: izmerene podatke na terenu koji predstavljaju ne-fazi brojeve i podatke u vidu fazi brojeva koji su procenjeni na osnovu znanja eksperta. U softveru, ulazni podaci se transformišu i spremaju za kreiranje eksperimentalnog variograma i krigovanja. Takođe, algoritam softvera omogućuje određivanje teoretskog variograma koristeći fazi eksperimentalni variogram. Rezultati fazi kriginga predstavljeni su kao karte parametra, koji se procenjuje (koeficijenta filtracije) u vidu izohipsi krigovanih vrednosti, kriging varijanse ili krigovane vrednosti parametra, koji se prikazuje u vidu obojenih polja

različitom bojom u zavisnosti od njegove vrednosti. Na taj način se konačno dobijaju karte sa prostornim rasporedom koeficijenta filtracije. Takođe, podaci dobijeni fazi krigingom u ovom softveru se mogu sačuvati u „ascii“ formatu i direktno uneti u softver za hidrodinamičko modeliranje podzemnih voda (Modflow).



Slika II-3.22: Struktura fazi kriginga (Bardossy et al., 1988; Bardossy et al., 1989)

3.7. Primena fazi logike u optimizaciji

Problem upravljanja nekim sistemom ponekad se ukazuje kao nerešiv, no daljim izučavanjem često se ustanovi da rešenje postoji, pa čak i da ima više mogućih rešenja. U tom slučaju se nailazi na problem određivanja „najboljeg“ rešenja, tj. optimizacije tog sistema.

Sama reč „optimum“ je sinonim za maksimalno dobro ili minimalno loše (Opricović, 1992). Za opisivanje i postizanje onog najboljeg, ukoliko je poznato kako da se meri i razlikuje šta je dobro, a šta loše, bavi se teorija optimizacije ili teorija odlučivanja, koja obuhvata kvantitativno proučavanje optimuma i metoda za određivanje optimuma. Proces odlučivanja sadrži tri opšta koraka, a to su:

- upoznavanje sistema,
- određivanje mere efektivnosti i
- optimizacija.

Pored toga što je teorija optimizacije numerički postupak za određivanje optimuma, ona se bavi i onim problemima koji nisu kompletno matematički formulisani. Zadatak optimizacije je da se izvrši izbor najbolje varijante iz niza mogućih ili povoljnih varijanti za usvojene kriterijume (podkriterijume). Najbolja varijanta se naziva optimalno rešenje optimizacionog zadatka i predstavlja kompromis između želje, tj. kriterijuma, i mogućnosti, tj. ograničenja.

Optimizacioni modeli pomažu u procesu odlučivanja, omogućujući ekspertu da poveže sve podatke i relacije u datoj situaciji, a rezultat toga treba da omogući izbor dobre, tj. optimalne alternative, savlađujući sve kompleksnosti zadatka. Primenom optimizacionih metoda ekspert dobija informacije koje ukazuju na posledice i uticaje izabrane odluke.

Primena metode optimizacije polazi od realnog problema koji treba rešavati. Optimizacioni modeli koriste prilaz „diskretnih modela“ kada se umesto izrade

sveobuhvatnog matematičkog modela projektuju varijantna rešenja. Postupak rešavanja optimizacionog modela ima sledeće faze (Opricović, 1992):

- formulisanje problema i definisanje ciljeva,
- prikupljanje podataka o sistemu,
- definisanje kriterijuma (podkriterijuma) za vrednovanje alternativnih rešenja,
- formulisanje i izrada alternativnih rešenja,
- vrednovanje alternativa,
- optimizacija - izbor najbolje varijante, tj. usvajanje konačnog rešenja - donošenje konačne odluke,
- završno projektovanje i
- implementacija.

Često se kod sistema javljaju neizvesnosti, tako se npr. kod vodoprivrednih sistema javljaju prirodne, ekonomske, društvene i institucionalne neizvesnosti. Prirodne neizvesnosti su posledica meteoroloških promena, zatim kod vrednovanja budućih šteta od poplava ili u ekonomskim analizama dobiti sa budućim cenama javljaju se neizvesnosti u ekonomskom smislu, potom i društvene neizvesnosti, koje uključuju nepoznavanje budućih potreba za vodom ili buduće preferencije (npr. zaštita okoline ovih godina ima veću težinu nego pre par desetina godina), kao i institucionalne neizvesnosti, koje se odnose na proces implementacije i kasniju podršku realizovanog sistema.

Zbog navedenih neizvesnosti najčešće su primenljivani stohastički sistemi u kojima se javljaju slučajne veličine i stohastički procesi. Shodno tome, najjednostavniji prilaz u svođenju stohastičkog zadatka na deterministički zadatak je da se slučajna veličina zameni njenom očekivanom (srednjom) vrednošću ili nekom kritičnom vrednošću (najnepovoljnija).

Kod ovakvih slučajeva nailazilo se na ograničenja, pa su prihvatljiva samo u slučajevima ako neizvesnost i promena slučajne veličine nemaju veliki uticaj na ceo sistem. Dalji razvoj nauke omogućio je da se neizvesnost i nepreciznost opisuju na

drugačiji način, čime se postižu robusnija i u određenim slučajevima efikasnija rešenja. Jedan od pristupa predstavlja primena teorije fazi logike, u kojoj je suština rad sa znanjem koje može biti veoma neprecizno i izraženo u verbalnom obliku. „Znanje“ se u fazi logičkim sistemima predstavlja u obliku ekspertskih pravila, koja označavaju pogodan verbalni oblik za izražavanje znanja. Na takav način, primenom fazi logike u optimizaciji, ostvaruje se veza između prirodnog jezika koji koristi čovek i numeričkih podataka koje koristi računar.

* * *

Jedan od faktora koji ograničava primenu standardnih metoda kod donošenja odluka u hidrogeologiji je česta nedovoljna raspoloživost podataka. Doprinos metoda baziranih na fazi logici u nauci kod odlučivanja sastoji se u sposobnosti fokusiranja na prevazilaženje takvih nedostataka. Primenom metode fazi optimizacije - fazi analitičko hijerarhijskog procesa (FAHP), ukazano je na njene vidove korišćenja kao kvalitativne tehnike koja se zasniva na prosuđivanju, tj. ocenjivanju i iskustvu donosilaca odluka u vrednovanju informacije, da bi se došlo do najbolje odluke između više alternativa.

Donošenje odluka je proces ocenjivanja alternativa koje zadovoljavaju postavljeni cilj, odnosno kriterijume i podkriterijume. Problem je odabrati alternativu koja najbolje zadovoljava kompletan skup svih kriterijuma. Proces donošenja odluka se sastoji u određivanju numerički iskazanih vrednosti (težinski koeficijenti) alternativa u odnosu na podkriterijume, podkriterijume na kriterijume i kriterijume u odnosu na globalni cilj.

Samo donošenje odluke od strane eksperta predstavlja komplikovani proces, koji zahteva „višedimenzionalno“ mišljenje o brojnim povezanim faktorima koji utiču na izbor optimalne alternative. To znači da se odlučivanje vrši na više nivoa po hijerarhiji, gde se ekspert susreće i sa globalnim dilemama i sa dilemama na nižem nivou, koje zahtevaju samo jedan odgovor: „da” ili „ne”. Odgovor se daje u vidu lingvističkih varijabli, koje uzimaju svoju numeričku vrednost iz FAHP skale i time se daje prednost jednom posmatranom elementu (kriterijumu, podkriterijumu) u odnosu na drugi.

Na osnovu toga, može se zaključiti da je donošenje odluke kod izbora najbolje alternative kompleksan proces gde ključnu stvar predstavlja korišćenje logike, znanja, intuicije i iskustva eksperta.

Proračuni kod optimizacije uopšte uključuju i analiziranje i ocenjivanje različitih faktora od strane eksperta na osnovu kojih se dobija konačna odluka, a to je optimalna alternativa. Prema tome, jedan od najvažnijih delova procesa odlučivanja je kreativni deo koji podrazumeva određivanje faktora (kriterijuma i podkriterijuma) koji ulaze u sastav hijerarhije. Problem se rešava tako što se kreira hijerarhija po nivoima:

cilj – kriterijumi – podkriterijumi – pod-podkriterijumi – ... – alternative.

Generalno, teško je naći alternativu koja bi zadovoljila sve kriterijume istovremeno, ali se pronalazi prihvatljiv kompromis. Uopšteno, u inženjerskoj praksi to se odnosi na različite “želje”, pa tako investitor želi ekonomski isplativo rešenje jer to direktno utiče na cenu proizvoda. S druge strane, širu društvenu zajednicu ne zanima cena, već su “želje” usmerene ka zaštiti i sprečavanju ugrožavanja životne sredine, dok su “želje” projektanta usmerene ka izboru efektivnog rešenja koje će ispuniti zadatak projekta, a tu se najvećim delom oslanja na pouzdanost tehničkog rešenja, uzimajući u obzir delimično ekonomske i ekološke faktore.

3.7.1. Izbor kriterijuma za fazi optimizaciju

Kako bi se izvršio proces optimizacije, ocenjuju se različiti kriterijumi i njegovi niži elementi, kao što su podkriterijumi, a koji imaju uticaja na izbor optimalnog rešenja kod postavljenog i razmatranog problema. Najznačajniji kriterijumi oblasti koje tretiraju problematiku podzemnih vodnih resura su:

- tehnički,
- ekonomski,
- ekološki, a često i
- socijalni faktori.

Podkriterijume, koji spadaju u pomenute kriterijume, izučavali su različiti autori: Ardakanian & Zarghami (2004), Rezaei-Moghaddam & Karami (2008), Zarghami & Szidarovszky (2011), Sanguanduan & Nititvattananon (2011), Choi et al. (2012), Domenech et al. (2013) i Masoumi et al. (2014). U zavisnosti od postavljenog problema, koji se rešava metodom višekriterijumske optimizacije i mišljenja eksperta o uticaju kriterijuma i podkriterijuma na izbor optimalne alternative, dat je pregled nekih podkriterijuma od gore pometutih kriterijuma:

- usaglašenost sa političkim planovima,
- usaglašenost sa logističkim planovima,
- uticaj na druge projekte,
- institucionalna saradnja,
- tehnološka jednostavnost,
- pouzdanost (npr. tehničko rešenje),
- mogućnost obavljanja radova u fazama,
- jednostavnost rada i održavanja,
- produktivnost,
- prioritet upotrebe,
- „cost-benefit” analiza,
- obim investicija,
- rizik ulaganja,
- diversifikacija finansijskih sredstava,
- profitabilnost, tj. ekonomska korist,
- procenjena šteta (npr. ekonomska ili ekološka),
- kapitalni troškovi,
- troškovi rada i održavanja,
- troškovi monitoringa,
- vlasništvo nad „zemljištem“,
- geološke karakteristike,
- hidrološke karakteristike,
- karakteristike zemljišta,
- reljef i geomorfološki uslovi,

- usklađenost sa klimatskim uslovima,
- minimalna šteta na kulturnu baštinu,
- opseg uticaja na životnu sredinu,
- zaštita životne sredine (slivnog područja),
- održivo korišćenje vodnih resursa,
- kvalitet površinskih i podzemnih voda,
- trenutna potrošnja voda i prognoza potrošnje za višegodišnji period (npr. 20 godina),
- potrošnja električne energije,
- lokacija,
- zapošljavanje,
- učešće javnosti,
- rekreacija i turizam,
- upravljanje prirodnim katastrofama - „poplave-suše”,
- korišćenje zajedničkih voda (npr. međugranične vode),
- smanjenje konflikta između interesnih grupa,
- javno prihvatanje (npr. tehničkog rešenja),
- nestašica vode.

Definisanje faktora (kriterijuma i podkriterijuma) ima uticaj na konačno rešenje, kao i na izbor optimalne alternative. Rešavanjem problema postavljanjem hijerarhije ukazuje na put ka dobrom donošenju odluke, jer se faktori koji utiču na postavljeni problem rangiraju prema značaju za odluku: od vrha prema dnu hijerarhije. To znači da su elementi u hijerarhiji sa nižeg nivoa pod uticajem elemenata sa višeg nivoa, pa kako raste neodređenosti elementa, on zauzima viši nivo. U slučaju da su alternative u odnosu na kriterijum jednake ili približno jednake, kriterijum se može eliminisati iz analize ili razdvojiti na nekoliko podkriterijuma (Dyer, 1990; Dyer, 1990a; Saaty, 1990a; Harker & Vargas, 1990). Kod rasporeda uticaja „odozgo na dole“, glavni cilj (rešenje postavljenog problema) na vrhu ima uticaj 100% (tj. u fazi logici vrednost 1). Kada se proces kreiranja hijerarhije završi, pokazuje se da je postavljanje prioriteta elemenata hijerarhija relativno jednostavno. Zbir uticaja svih alternativa predstavlja težinski

koeficijent sa vrednošću 1, a alternativa sa najvećom vrednošću težinskog koeficijenta predstavlja „najbolju” alternativu.

3.7.2. Metoda analitičko hijerarhijskog procesa (AHP metoda)

Metoda analitičko hijerarhijskog procesa (eng. „the Analytic Hierarchy Process - AHP“), koja je razvijena od strane Thomas Saaty-ja početkom 70-ih godina XX veka, spada u klasu metoda tzv. „meke“ optimizacije. Ova metoda označava savremeniji pristup u procesu višekriterijumskog odlučivanja prilikom rešavanja kompleksnih problema, tj. za izbor neke od alternativa (scenarija) koji imaju različitu važnost. Sam proces odlučivanja je naučno zasnovan na tri koncepta, od kojih i potiče ime metode: analitika, hijerarhija i proces (Saaty, 1990; Vargas, 1990). Stoga, metoda analitičko hijerarhijskog procesa je:

- analitička, jer koristi brojeve, a problem odlučivanja se opisuje matematičkim modelom;
- hijerarhijska, jer je strukturalno raspoređena po nivoima: cilj, kriterijumi, podkriterijumi i alternative;
- proces, jer je odluka, odnosno ishod procesa, odlučivanje koje podrazumeva procese učenja, diskusiju i procenu prioriteta.

Odlučivanje se započinje razlaganjem složenog problema u hijerarhiju sa kriterijumima, podkriterijumima i alternativama na određenim nivoima i podnivoima hijerarhije. Donosilac odluke, tzv. ekspert, vrši poređenje parova elemenata na svakom nivou hijerarhije u odnosu na elemente u višem nivou korišćenjem neke od preferentnih skala, najčešće tzv. Satijeve skale (Saaty, 1980). Krajnji rezultat jesu vektori relativnog prioriteta (težinski koeficijenti ili vektori težinskih prioriteta) alternativa u odnosu na postavljeni cilj.

Širok spektar primene AHP metode kao npr. u odlučivanju, evaluaciji, alokaciji resursa, planiranju i razvoju, industriji, inženjerstvu, politici, obrazovanju (Zadehi, 1986) pokazuje da je ona danas jedna od najprimenljivijih metoda višekriterijumske

optimizacije. Začetnikom ove metode smatra se Saaty, kako je već navedeno, a on se i nadalje bavio njenim razvojem i usavršavanjem (Saaty, 1977; Saaty, 1980; Saaty & Vargas, 1990; Saaty, 2000; Saaty & Cho, 2001; Saaty, 2005; Saaty & Peniwati, 2007; Saaty, 2011).

Koncept primene metode AHP u cilju analize hijerarhije i procesa odlučivanja ogleda se u sledećem: najpre se uspostavlja interaktivno kreiranje hijerarhije problema, sa sugerisanih 3-7 elemenata na svakom nivou (Saaty, 1980). Ovo predstavlja direktnu pripremu za odlučivanje pri izboru alternativa, pa se kreiraju matrice za sve nivoe i vrši vrednovanje u parovima elemenata hijerarhije (ciljeva, kriterijuma, podkriterijuma, alternativa) u smeru „odozdo“ ili „odozgo“. Ukoliko je u pitanju primena hijerarhijskog koncepta od najnižih ka najvišim („odozdo“), ekspert kroz poređenje alternativa može posredno saznati o značaju kriterijuma, a u drugom slučaju se prvo vrši vrednovanje i određuju prioriteti kriterijuma, a zatim se nastavlja sa vrednovanjem podkriterijuma u odnosu na kriterijume, kao i alternativa u odnosu na podkriterijume. Na kraju se obavlja sinteza svih upoređivanih elemenata pomoću skale relativne važnosti (skale vrednovanja).

U razvoju skala vrednovanja postoje dva pristupa, a to su linearni pristup (Saaty, 1980) i eksponencijalni pristup (Lootsma, 1988; Lootsma, 1990; Lootsma et al, 1990). Oba pristupa su zasnovana na određenim teorijama iz oblasti psihologije, a prvi je dominantniji u primeni. Vezujući se za Miller-ova (1956) psihološka istraživanja, koja su pokazala da pojedinac ne može istovremeno porediti više od 7 objekata (± 2), Saaty (1980) je uspostavio skalu koja se smatra standardom za AHP (tabela II-3.2).

Osnovu Satijeve skale čine: skup elemenata, skup brojeva i preslikavanja, pomoću kojih se svakom elementu pridružuje neki broj iz ponuđenog skupa brojeva. Najviša vrednost na skali je 9, a najniža vrednost je 1. Neparnim brojevima prikazane su osnovne vrednosti, a parnim njihove međuvrednosti. Takođe, postoje i recipročne vrednosti, koje imaju identično definisanje što se tiče „jačine dominacije“, a predstavljaju suprotnu važnost kod poređenja 2 elementa u matrici u smislu „red-kolona – kolona-red“.

Tabela II-3.2: Satijeva skala relativne važnosti (1980)

Intenzitet važnosti (numeričke vrednosti)	Lingvistička varijabla (definicija važnosti)	Objašnjenje
1	Istog značaja	Dva elementa su identičnog značaja u odnosu na cilj
3	Umereno važnije	Na osnovu iskustva i procena favorizuje se jedan element u odnosu na drugi
5	Strogo važnije	Na osnovu iskustva i procena strogo se favorizuje jedan element u odnosu na drugi
7	Vrlo stroga, dokazana važnost	Dominantnost jednog elementa je potvrđena u praksi i on se favorizuje u odnosu na drugi
9	Ekstremna važnost	Dominantnost jednog elementa najvišeg stepena
2,4,6,8	Međuvrednosti	Potreban kompromis ili dalja podela
1/2,1/3,...1/9	Suprotna važnost	Recipročna vrednost kod poređenja istih elemenata (red-kolona – kolona-red)

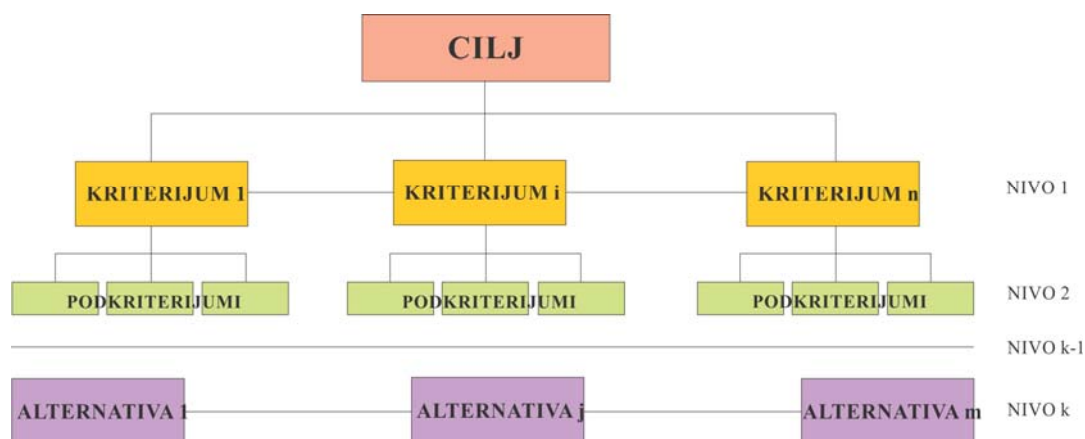
Po utvrđenom matematičkom modelu u sledećem koraku se određuju težinski koeficijenti svih elemenata hijerarhije, čija je suma na svakom nivou jednaka 1. Metoda AHP omogućava interaktivnu analizu osetljivosti postupka vrednovanja na konačne rangove elemenata hijerarhije. Tokom vrednovanja elemenata hijerarhije sve do kraja postupka i sinteze rezultata, proverava se konzistentost rezonovanja donosioca odluka i utvrđuje ispravnost dobijenih rangova alternativa i kriterijuma, kao i njihovih težinskih vrednosti (vektor težinskih prioriteta). Na osnovu analize osetljivosti sagledava se uticaj promena ulaznih podataka u odnosu na izlazne rezultate. Prikazanim konceptom, tj. modelom, moguće je simulirati važnost kriterijuma i podkriterijuma, ali i posmatrati promene u rangovima alternativa. Analiza osetljivosti se može izvesti iz cilja ili iz bilo kog drugog elementa u hijerarhiji, kako bi se utvrdilo da li je rang lista alternativa dovoljno

stabilna u odnosu na prihvatljive promene ulaznih podataka. Ukoliko se promenom podataka za 5% u svim mogućim kombinacijama ne promeni rang alternativa, smatra se da je postignuta stabilnost rezultata (Bayazit, 2005).

Ako se posmatra problem koji treba rešiti metodom AHP, takav proces se zasniva na razlaganju složenog problema u hijerarhiji, kako je prikazano na slici II-3.23. Cilj se nalazi na vrhu hijerarhije i ne poredi se ni sa jednim od drugih elemenata, a kriterijumi i podkriterijumi su odmah ispod, dok najniži mogući nivo čine alternative. Na nivou 1 je „n“ kriterijuma koji se u parovima, svako sa svakim, porede u odnosu na neposredno nadređeni element na višem nivou (koji na nultom nivou predstavlja cilj). Za analizu je potrebno je ukupno $\frac{n(n-1)}{2}$ poređenja, što znači da je broj poređenja proporcionalan kvadratu broja elemenata koji se upoređuju. Isti postupak se primenjuje idući kroz hijerarhiju od viših ka nižim nivoima, sve dok se na poslednjem nivou „k“ ne izvrše poređenja svih alternativa u odnosu na nadređene kriterijume na predposlednjem „k-1“ nivou. Hijerarhija ne mora uvek da bude kompletna, kao u slučaju kada element na nekom nivou ne mora da predstavlja kriterijum za sve elemente u podnivou, tako da se hijerarhija može podeliti na podhijerarhije kojima je zajednički element na vrhu hijerarhije (Saaty, 1980).

Saaty (1977; 1980) je definisao i aksiome na kojima se zasniva metoda AHP:

- recipročnost: ako je element A „n“ puta značajniji od elementa B, tada je element B „ $\frac{1}{n}$ “ puta značajniji od elementa A;
- homogenost: poređenje ima smisla jedino ako su elementi uporedivi;
- zavisnost: ovaj aksiom dozvoljava poređenje među grupom elemenata jednog nivoa u odnosu na element višeg nivoa, što znači da poređenja na nižem nivou zavise od elemenata višeg nivoa;
- očekivanje: svaka promena u strukturi hijerarhije zahteva ponovno računanje prioriteta u novoj hijerarhiji.



Slika II-3.23: Primer opšteg hijerarhijskog modela kod metode AHP

3.7.3. Osnovni koncept fazi analitičko hijerarhijskog procesa (FAHP)

Kako je ranije navedeno, Bellman & Zadeh (1960) su predložili primenu teoriju fazi logike za modeliranje složenih sistema. Međutim, u mnogim slučajevima, zbog svoje kompleksnosti, dosta elemenata kod kreiranja modela je neizvesno, pa donosioci odluka nisu u mogućnosti da odrede tačne numeričke vrednosti za poređenje odluka i stoga se problem ne može jasno definisati ili predstaviti klasičnom vrednošću (Bellman & Zadeh, 1960). U slučajevima kada je potrebno postaviti prioritete i doneti najbolju odluku, uzimajući u obzir i kvalitativne i kvantitativne pokazatelje, analitičko hijerarhijski proces predstavlja veoma moćnu i fleksibilnu metodu. Uprkos praktičnosti metode AHP u rukovanju sa kvalitativnim i kvantitativnim kriterijuma kod višekriterijumske optimizacije i donošenja odluke, postoji i dalje nejasnoća („fuzziness“, eng.) i neodređenost, pa kod mnogih problema pri odlučivanju može doći do nepreciznih odluka eksperta (Bouyssou et al., 2000). Daljim razvojem se metoda FAHP može predstaviti kao naprednija analitička metoda u odnosu na metodu AHP. Modifikacija metode AHP u FAHP se sastoji u tome da je relativan odnos važnosti kriterijuma optimalnosti opisan lingvističkim iskazima, koje određuju eksperti, a modeliraju se fazi brojevima, odnosno, elementi matrice parova upoređenja relativnog odnosa važnosti kriterijuma optimalnosti su opisani fazi brojevima. Brojni autori u svojim radovima (Van Laarhoven & Pedrycz, 1983; Boender et al, 1989; Chang, 1996;) su unapredili metodu AHP i dokazali da se metoda FAHP, koja podrazumeva korišćenje

koncepta fazi logike i hijerarhijske strukturne analize, relativno bolje nosi sa problemom selekcije i daje bolji rezultat kod donošenja odluke. Jedan od prvih implementiranih FAHP pristupa je primenjen od strane Van Laarhoven-a & Pedrycz-a (1983) u kome su fazi vrednosti opisane pomoću funkcije pripadnosti trougaonih fazi brojeva. Noviji pristup u metodi FAHP postavio je Chang (1996) primenom trougaonih fazi brojeva i FAHP skale za poređenje parova.

Metodologija bazirana na fazi analitičko hijerarhijskom procesu omogućava da se donese efikasna odluka i olakša rešavanje problema neizvesnosti i neodređenosti u tom procesu, posebno kada su u pitanju složeni problemi sa brojnim neodređenostima. FAHP se sastoji od izvođenja lokalnih prioriteta iz fazi prioriternih odnosa, koji su kasnije združeni da formiraju globalne pokazatelje. Pomoću metode FAHP mogu se sračunati fazi prioriteti na osnovu aritmetičkih operacija koje važe za trougaone fazi brojeve. Da bi se koristile fazi aritmetičke operacije, moraju se poštovati pravila vezana za funkcije pripadnosti. Kod metode FAHP, poređenje alternativa se vrši tako što se formiraju parovi koji se porede. Kriterijumi za selekciju se utvrđuju i porede se sa podkriterijumima, a zatim se za isti nivo po značaju za svaki kriterijum vrši proračun procesa prema napravljenoj hijerarhijskoj strukturi. U poređenju fazi parova, donosioc odluke ispituje dve alternative razmatranjem jednog kriterijuma i ukazuje na prednost. Na primer, ako se posmatra opšta hijerarhija zasnovana na tri nivoa (cilj-kriterijumi-alternative) sa M kriterijuma i N alternativa, tada se na nivou kriterijuma isti porede u parovima u odnosu na cilj, a na nivou alternativa iste se međusobno porede u odnosu na svaki kriterijum posebno. Rezultati poređenja se, kao brojevi iz FAHP skale, unose u odgovarajuće matrice na osnovu kojih se računaju lokalni vektori prioriteta, tj. težinski koeficijenti elemenata koji su poređeni. Kako je već navedeno, poređenja parova se vrše korišćenjem skale za poređenje koja dodeljuje numeričke vrednosti. Standardna skala, tzv. skala relativne važnosti, koja se koristi za AHP kreće se od 1 do 9 i pokazuje važnost od „iste-jednake važnosti“ do „ekstremne važnosti“ (Saaty 1980, Saaty 1991). Od više ponuđenih FAHP skala najbliža originalnoj Satijevoj skali je fazifikovana Satijeva skala predložena od strane Zhu et al. (1999) i Lamata (2004) prikazana u tabeli II-3.3. Slična prethodnoj skali je FAHP skala prikazana u tabeli II-3.4 (Cheng, 1996;

Deng, 1999). Još jedan primer FAHP skale dali su Tolga et al. (2005) koja je prikazana u tabeli II-3.5.

Tabela II-3.3: FAHP skala (Zhu et al., 1999; Lamata, 2004)

Lingvistička varijabla (definicija važnosti)	AHP skala	FAHP skala	
		Trougaoni fazi broj	Recipročni trougaoni fazi broj
jednaka	1	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
jednaka do umerena	2	(1, 2, 3)	(1/3, 1/2, 1)
umerena	3	(2, 3, 4)	(1/4, 1/3, 1/2)
umerena do jaka	4	(3, 4, 5)	(1/5, 1/4, 1/3)
jaka	5	(4, 5, 6)	(1/6, 1/5, 1/4)
jaka do veoma jaka	6	(5, 6, 7)	(1/7, 1/6, 1/5)
veoma jaka	7	(6, 7, 8)	(1/8, 1/7, 1/6)
veoma jaka do izuzetno jaka	8	(7, 8, 9)	(1/9, 1/8, 1/7)
izuzetno jaka	9	(8, 9, 9)	(1/9, 1/9, 1/8)

Tabela II-3.4: FAHP skala (Cheng, 1996; Deng, 1999)

Lingvistička varijabla (definicija važnosti)	AHP skala	FAHP skala
		Trougaoni fazi broj ($0.5 \leq \alpha \leq 2$)
jednaka	1	(1, 1, $1+\alpha$)
slaba	3	($3-\alpha$, 3, $3+\alpha$)
jaka	5	($5-\alpha$, 5, $5+\alpha$)
dokazana dominantnost	7	($7-\alpha$, 7, $7+\alpha$)
apsolutna dominantnost	9	($9-\alpha$, 9, 9)
međuvrednosti	2, 4, 6, 8	($x-1$, x , $x+1$) $x=2, 4, 6, 8$

Tabela II-3.5: FAHP skala (Tolga et al., 2005)

Lingvistička varijabla (definicija važnosti)	Trougaoni fazi broj
Apsolutna (red - kolona)	(7/2, 4, 9/2)
Vrlo jaka (red - kolona)	(5/2, 3, 7/2)
Prilično jaka (red - kolona)	(3/2, 2, 5/2)
Slaba (red - kolona)	(2/3, 1, 3/2)
Jednaka	(1, 1, 1)
Slaba (kolona - red)	(2/3, 1, 3/2)
Prilično jaka (kolona - red)	(2/5, 1/2, 2/3)
Vrlo jaka (kolona - red)	(2/7, 1/3, 2/5)
Apsolutna (kolona - red)	(2/9, 1/4, 2/7)

Postoje mnoge FAHP metode u literaturi predložene koje predlažu različiti autori. Van Laarhoven & Pedrcyz (1983) pokrenuli su prve studije o postupcima donošenja odluke, gde se koriste fazi logika i analitičko hijerarhijski proces (Saaty, 1980). U radu su prikazali izbor jedne od više alternativa, kao i analizu različitih kriterijuma, koristeći postupke koje su postavili Graan (1980) i Lootsma (1981). Korišćeni su trougaoni fazi brojevi, da bi se izrazila ocena donosioca odluke (eksperta) o alternativama prema svakom zadatom kriterijumu, dok za istu svrhu Buckley (1985) upotrebljava trapezoidne fazi brojevi.

Chang (1996) uvodi novi pristup u metodi FAHP, koristeći trougaone fazi brojeve, FAHP skalu i metod stepene analize (eng. extent analysis method) za poređenje parova. Detaljnije, Chan & Kumar (2007) se bave metodom stepene analize u FAHP, a takođe uključuju faktore rizika koji obuhvataju neizvesne podatke, korišćene pri donošenju odluka. Deng (1999) je predstavio fazi pristup za rešavanje problema kvalitativne višekriterijumske analize na primeru problema selekcije tendera. Zhu et al. (1999) predstavili su osnove teorije fazi trougaonih brojeva i doprineli boljem pristupu pri njihovom poređenju, dok su praktičnu primenu teorije pokazali na primeru naftnog ležišta. Leung & Cao (2000) su predložili definiciju fazi doslednosti sa razmatranjem

tolerancije pri odstupanju, gde su, u suštini, fazi pokazatelji relativnog značaja koji omogućavaju određenu toleranciju pri odstupanju formulisani kao ograničenja na vrednosti funkcije pripadnosti lokalnih prioriteta. Chou & Liang (2001) su predložili koncept fazi višekriterijumskog odlučivanja kombinovanjem fazi teorije i analitičko hijerarhijskog procesa. Bozdog et al. (2003) su predstavili probleme kod višekriterijumskog odlučivanja, uključujući i kvantitativne i kvalitativne kriterijume koristeći „Yager’s weighted goals“ metodu i metodu fazi sintetičke evaluacije. Pored toga, Chang et al. (2003) uvode i statističke metode pri izboru kriterijuma i metodu FAHP pri određivanju težine kriterijuma (koeficijent težinskih prioriteta). Enea & Piazza (2004) se bave problemima prilikom izbora alternativa, zbog mnogobrojnih različitih ciljeva i zadatih elemenata kod metode FAHP, i pritom objašnjavaju kako se može postići najbolji rezultat, tj. najbolji izbor alternative u pogledu sigurnosti i pouzdanosti. Tuysuz & Kahraman (2006) se bave procenom rizika pri nejasnim i nepotpunim podacima, uvodeći metodu FAHP.

3.7.4. Prikaz koncepta fazi optimizacije i izbor metode

Chang (1996) je zaslužan za prvo predstavljanje metode po kojoj se vrši optimizacija putem fazi analitičko hijerarhijskog procesa, pomoću trougaonih fazi brojeva i FAHP skale, a na primeru selekcije kandidata za zapošljavanje prema različitim kriterijumima. Chang-ovu (1996) metodu višekriterijumskog odlučivanja je dodatno usavršio i razvio Deng (1999). Kombinacijom fazi pristupa, tj. korišćenjem trougaonih fazi brojeva i AHP metode, razvijen je FAHP model u okviru ove doktorske disertacije, koji se primenjuje u donošenju odluke prilikom izbora optimalnog sistema za odbranu površinskog kopa od podzemnih voda (Bajić & Polomčić, 2015). Nadalje u tekstu je prikazan postupak rešavanja problema prema pomenutim novijim metodama postupno u koracima.

Osnovni pojam u FAHP metodi je trougaoni fazi broj. Neka $F(R)$ predstavlja sve fazi skupove, a R skup realnih brojeva. Neka se $M \in F(R)$ nazove fazi broj ako:

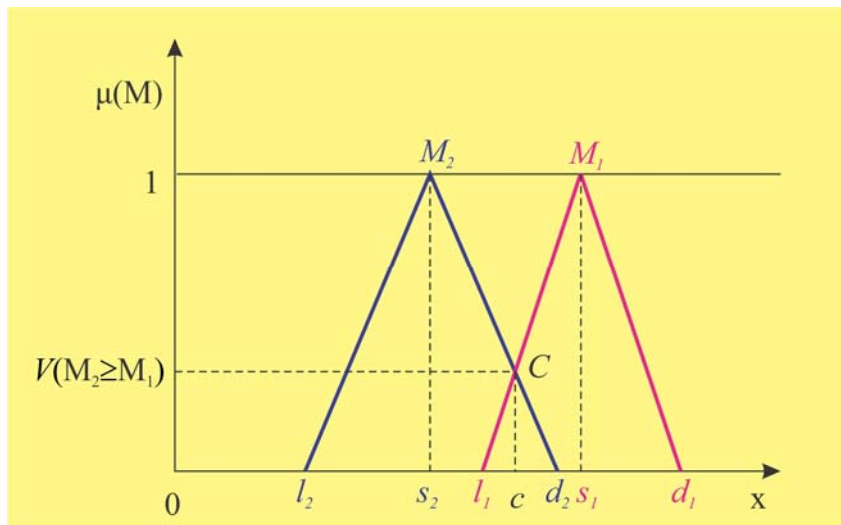
- postoji $x_0 \in R$ tako da je $\mu_M(x_0) = 1$;
- za svako $\alpha \in [0, 1]$, $A_\alpha = [x, \mu_{A_\alpha}(x) \geq \alpha]$ je zatvoren interval.

Fazi broj M na skupu R definiše se kao trougaoni fazi broj, ako je njegova funkcija pripadnosti $\mu_M(x): R \rightarrow [0, 1]$ definisana na sledeći način:

$$\mu_M(x) = \begin{cases} \frac{x}{s-l} - \frac{l}{s-l}, & x \in [l, s] \\ \frac{x}{s-d} - \frac{d}{s-d}, & x \in [s, d] \\ 0, & x \notin [l, d] \end{cases}$$

gde je $l \leq s \leq d$.

Na ovaj način, fazi broj M može biti označen kao $M(l, s, d)$, što je ilustrativno prikazano na slici II-3.24. Prema datoj definiciji (poglavlje II-3.3), podrška fazi skupa M je skup elemenata $\{x \in R | l < x < d\}$, a ako je $l = s = d$, pa tada ovaj fazi broj prelazi u klasičnu vrednost (poglavlje II-3.4.).



Slika II-3.24: Trougaoni fazi brojevi

Neke osnovne operacije koje se koriste u ovoj metodi su nadalje prikazane. Ako se razmatraju dva trougaona fazi broja (slika II-3.24): $M_1 = (l_1, s_1, d_1)$ i $M_2 = (l_2, s_2, d_2)$, prema zakonima računskih operacija sledi:

$$\begin{aligned}(l_1, s_1, d_1) \oplus (l_2, s_2, d_2) &= (l_1 + l_2, s_1 + s_2, d_1 + d_2); \\(l_1, s_1, d_1) \odot (l_2, s_2, d_2) &= (l_1 l_2, s_1 s_2, d_1 d_2); \\(\lambda, \lambda, \lambda) \odot (l_1, s_1, d_1) &= (\lambda l_1, \lambda s_1, \lambda d_1), \lambda > 0, \lambda \in R; \\(l_1, s_1, d_1)^{-1} &= \left(\frac{1}{d_1}, \frac{1}{s_1}, \frac{1}{l_1} \right).\end{aligned}$$

Korak 1 - definisanje matrice kriterijuma. Veza između numeričkih vrednosti trougaonih fazi brojeva i lingvističkih varijabli predstavljena je fazifikovanom Saaty-jevom skalom (Cheng, 1996; Deng, 1999; Tolga, 2005). Tu su unapred definisani faktori koji utiču na izbor jedne od više alternativa, a pravi se matrica kriterijuma X sa trougaonim fazi brojevima, koje dodeljuje donosilac odluke (ekspert), koristeći FAHP skalu.

Korak 2 - određivanje vrednosti fazi sintetičkog stepena. Neka je $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ skup na koji se vrši analiza, a $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ ciljni skup. Za sve elemente skupa X se vrši stepena analiza (eng. „extent analysis“) za svaki element skupa G (Chang 1992, Chang 1995). Na taj način formira se m vrednosti stepenih analiza za svaki element skupa X :

$$M_{g_i}^1, M_{g_i}^2, \dots, M_{g_i}^m, i = 1, 2, \dots, n$$

gde su svi $M_{g_i}^j$, $j = 1, 2, \dots, m$ trougaoni fazi brojevi.

Neka sa $M_{g_i}^1, M_{g_i}^2, \dots, M_{g_i}^m$ budu označene stepene analize za elemente tih skupova za m . U tom slučaju se vrednosti fazi sintetičkog stepena (za i elemenata) računaju na sledeći način:

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1},$$

dok se u slučaju razmatranja trougaonih fazi brojeva oblika $M = (l, s, d)$ računaju na ovaj način:

$$(M_1 = (l_1, s_1, d_1), M_2 = (l_2, s_2, d_2) \dots):$$

$$\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \left(\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m s_j, \sum_{j=1}^m d_j \right)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \left(\sum_{i=1}^n l_i, \sum_{i=1}^n s_i, \sum_{i=1}^n d_i \right), \text{ gde je: } M_{g_i}^j (j = 1, 2, \dots, n)$$

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n d_j}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n s_j}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_j} \right)$$

Konačno, vrednost fazi sintetičkog stepena se izražava kao:

$$S_i = \left(\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m s_j, \sum_{j=1}^m d_j \right) \otimes \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n d_j}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n s_j}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_j} \right)$$

Korak 3 - određivanje stepena mogućnosti (eng. „degree of possibility“). Prvi zadatak fazi analitičkog hijerarhijskog procesa bio je pravljenje odluke o relativnoj

važnosti za svaki par faktora iste hijerarhije. Koristeći trougaone fazi brojeve, poređenjem udvojenih parova (elemenata), formira se fazi matrica: $A = (a_{ij})_{n \times m}$ gde je $a_{ij} = (l_{ij}, s_{ij}, d_{ij})$, što zadovoljava uslov:

$$l_{ij} = \frac{1}{l_{ji}}, s_{ij} = \frac{1}{s_{ji}}, d_{ij} = \frac{1}{d_{ji}}$$

Poslednji korak FAHP predstavlja određivanje vektora težinskih prioriteta za svaki kriterijum, a za to je potrebno da se razmotri princip poređenja fazi brojeva, tj. operacija „min“ i „max“ strategije ili vrednosti. Na osnovu prethodnog se u narednom koraku određuje se stepen mogućnosti dva trougaona fazi broja, koristeći princip poređenja fazi brojeva.

Ako se porede dva trougaona fazi broja $M_1 \geq M_2$, stepen mogućnosti je definisan na sledeći način:

$$V(M_1 \geq M_2) = \sup_{x \geq y} [\min(\mu_{M_1}(x), \mu_{M_2}(y))]$$

Kada parovi (x, y) postoje, takvi da je $x \geq y$ i $\mu_{M_1}(x) = \mu_{M_2}(y) = 1$, onda je $V(M_1 \geq M_2) = 1$. Kako su M_1 i M_2 konveksni trougaoni fazi brojevi sledi:

$$V(M_1 \geq M_2) = 1 \text{ if } s_1 \geq s_2$$

$$V(M_2 \geq M_1) = 1 = hgt(M_1 \cap M_2) = \mu_{M_1}(c)$$

gde je c ordinata najvišeg preseka u tački C između funkcija pripadnosti μ_{M_1} i μ_{M_2} (slika II-3.24).

Konačno, stepen mogućnosti za trougaone fazi brojeve $M_1 = (l_1, s_1, d_1)$ i $M_2 = (l_2, s_2, d_2)$, ekvivalentno se može izraziti na sledeći način (tačka C):

$$V(M_2 \geq M_1) = hgt(M_1 \cap M_2) = d_{M_2}(c) = \begin{cases} 1, & \text{if } s_2 \geq s_1 \\ 0, & \text{if } l_1 \geq d_2 \\ \frac{l_1 - d_2}{(s_2 - d_2) - (s_1 - l_1)}, & \text{ostalo} \end{cases}$$

Da bi se uporedili M_1 i M_2 trougaoni fazi brojevi potrebne su obe vrednosti, tj. i $V(M_1 \geq M_2)$ i $V(M_2 \geq M_1)$.

Stepen mogućnosti za konveksni trougaoni fazi broj da bude veći od k konveksnog fazi broja M_i , gde je $i = 1, 2, \dots, k$ može se definisati kao kao:

$$V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = V[(M \geq M_1) \wedge (M \geq M_2) \wedge \dots \wedge (M \geq M_k)] = \min V(M \geq M_i)$$

Na osnovu prikazanog, dobija se izraz:

$$c^*(A_i) = \min V(S_i \geq S_k), \quad k = 1, 2, \dots, n; \quad k \neq i$$

Korak 4 - određivanje vektora težinskih prioriteta. Nastavljajući prethodni korak, definišu se vektori težinskih prioriteta na sledeći način:

$$W^* = (c^*(A_1), c^*(A_2), \dots, c^*(A_n))^T \text{ gde je } A_i (i = 1, 2, \dots, n)$$

Posle njihove normalizacije, dobija se normalizovani težinski vektor prioriteta:

$$W = (c(A_1), c(A_2), \dots, c(A_n))^T$$

gde vrednost W predstavlja defazifikovan, klasičan, ne- fazi broj.

Korak 5. U ovom koraku, porede se alternative za svaki kriterijum posebno, te se tako formiraju matrice i određuju vektori težinskih prioriteta poštujući opisanu proceduru od koraka 1 do 4.

Korak 6. U ovom koraku određuju se konačne težine alternativa, koje se dobijaju tzv. aditivnom agregacijom, tj. množenjem vektora težinskih prioriteta dobijenih iz matrice kriterijuma i vektora težinskih prioriteta dobijenih u koraku 5. Alternativa sa najvećom vrednosti vektora težinskih prioriteta predstavlja optimalnu alternativu.

Primenu opisane Chang-ove metode u hidrogeologiji, koja označava spoj hidrodinamičke analize i fazi optimizacije, prikazali su Bajić & Polomčić (2014) za potrebe projektovanja sistema odbrane od podzemnih voda na primeru priobalja Dunava. Uzev u obzir prethodnu hidrodinamičku analizu (Polomčić & Bajić, 2014), koja tretira problematiku obaranja nivoa podzemnih voda, formirane su tri varijante (alternative) rešenja sistema odbrane od podzemnih voda, kao i njegove karakteristike kojim se štiti područje buduće crpne stanice „Bezdan 1“. Korišćenjem fazi optimizacije - metode fazi analitičko hijerarhijskog procesa (FAHP), bazirane na trougaonim fazi brojevima, ali i analizom različitih faktora kao što su: vreme potrebno da se nivo podzemnih voda spusti na projektovani nivo, karakteristike sistema odbrane od podzemnih voda i faktor sigurnosti, date su različite ocene koje utiču na izbor optimalne varijante rešenja. Korišćenjem Chang-ove (1996) metode višekriterijumske optimizacije analizirane su tri alternative rešenja sistema odbrane od podzemnih voda, koje su utvrđene prethodno hidrodinamičkim modeliranjem. Na osnovu proračuna prema metodi fazi analitičko hijerarhijskih proračuna dobijene su ocene za svaku alternativu i donesena je odluka za optimalnu alternativu, pa je tako odabran optimalan sistem odbrane od podzemnih voda crpne stanice „Bezdan 1“.

Drugu metodu fazi optimizacije - višekriterijumskog odlučivanja bazirana na trougaonim fazi brojevima je predstavio je Deng (1999). Navedena metoda predstavlja

dopunu Chang-ove (1996) metode fazi stepene analize i fazi analitičko hijerarhijskog procesa.

Kako je već pomenuto, rešenje problema u fazi višekriterijumskoj analizi se bazira se na postavljanju:

- nekoliko alternativa - V_i , gde je $i = 1, 2, \dots, n$,
- skupa kriterijuma - C_j , gde je $j = 1, 2, \dots, m$,
- kvalitativne ili kvantitativne procene (ocena performansi), koje predstavljaju učinak svake alternative S_i u odnosu na svaki kriterijum C_j , gde se na osnovu toga definiše matrica odluke za alternative - x_{ij} , gde su $i = 1, 2, \dots, n$ i $j = 1, 2, \dots, m$;
- vektora težinskih prioriteta, koji predstavljaju relativnu važnost i ocenu svakog kriterijuma u odnosu na glavni cilj (problem) - $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$.

Fazi višekriterijumska analiza koju je predstavio Deng (1999) obuhvata, takođe, nekoliko faza koje su slične sa do sada pomenutim:

- određivanje važnosti kriterijuma i performansi alternativa,
- procene (ocenjivanje) u vezi sa svim kriterijumima za svaku alternativu bazirano na principu agregacije i
- rangiranje alternativa na osnovu ocenjivanja poštujući princip agregacije.

Odlučivanje kod višekriterijumske analize (Deng, 1999) vrši se prema sledećim koracima:

Korak 1. Razmatranje postavljenog problema, cilja i definisanje faktora: kriterijuma i nižih nivoa koji utiču na izbor optimalne alternative.

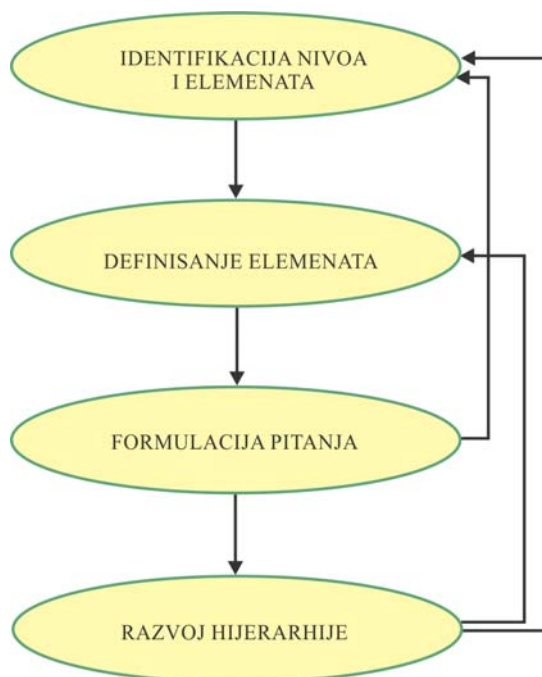
Korak 2. Sastavljanje matrica kriterijuma (i podkriterijuma) u odnosu na alternative korišćenjem FAHP skale i trougaonih fazi brojeva.

Posle definisanja faktora koji utiču na izbor optimalne alternative, kreiranje matrica odluke - definisanje hijerarhije u metodi FAHP predstavlja sledeći bitan korak, a vrši se u dve faze, koje obuhvataju: hijerarhijsko strukturiranje problema i procenu i sintezu (razvoj hijerarhije).

Hijerarhijsko strukturiranje problema zahteva iskustvo i znanje eksperta o problemu koji se razmatra. Čest je slučaj da dva eksperta jedan isti problem različito strukturiraju, pa tada hijerarhija postaje komplikovana. Zbog ovakvog projektovanja hijerarhije, kod kojeg postoje različiti pristupi rešavanju problema, neophodan je timski pristup, kako bi se ostvario konsenzus u procesu odlučivanja. U ovoj fazi se vrši:

- identifikacija nivoa i elemenata,
- definisanje elemenata i
- formulacija pitanja.

Projektovanje hijerarhije problema je iterativni postupak (slika II-3.25). Identifikacija nivoa i elemenata služi za formulaciju pitanja: „Da li je i koliko je jedan element bolji od drugog kod poređenja parova u matrici”? Ako ekspert ima teškoće da odgovori na formulisana pitanja, tada moraju da se modifikuju elementi i nivoi, da ne bi došlo do loše selekcije alternativa i kriterijuma optimalnosti. Za izbor faktora u procesu odlučivanja projektovanje hijerarhije problema predstavlja najvažniji postupak, a faktori koji se tretiraju u metodi FAHP su: definisanje kriterijuma optimalnosti koji su u skladu sa definisanim ciljem i definisanje podkriterijuma. Prilikom kreiranja hijerarhije problema od velike je važnosti temeljan prikaz problema, da model bude osetljiv na promene koje se dešavaju na elementima postavljenog problema, razmatranje okruženja u kojem problem odlučivanja postoji, kao i identifikacija „učesnika“ koji su povezani sa problemom. Kada se postupi redom po ovim stavkama, dobija se globalni pregled složenih relacija posmatranog problema, a samim tim ekspert lakše može da oceni da li su problemi na svakom nivou poređani prema važnosti i da tim putem uporedi homogene elemente.



Slika II-3.25: Kreiranje hijerarhije razmatranog problema i matrica odluke

U sledećoj fazi vrše se procena i sinteza, tj. na osnovu raspoloživih informacija ekspert određuje relativne odnose važnosti svakog para razmatranih elemenata u matrici: kriterijuma optimalnosti/podkriterijuma unutar svakog kriterijuma i podkriterijuma optimalnosti/alternativa, gde odgovara na pitanja da li je i koliko je jedan element bolji od drugog, pri razmatranju para elemenata u smislu jedne osobine, a zanemarivanjem ostalih osobina. Prethodno je pomenuto da se vrednost relativnog odnosa važnosti elemenata procenjuje pomoću skale mera - FAHP skale (tabele II-3.3 – II-3.5). Prednost ove metode je što omogućava ekspertu da napravi procenu na jednom hijerarhijskom nivou za razmatrani par elemenata nezavisno od ostalih hijerarhijskih nivoa.

Pravljenje matrica svih faktora (kriterijuma i podkriterijuma) u odnosu na glavni cilj i alternative, kao i upoređivanje parova u matricama, igraju bitnu ulogu kod izbora optimalne alternative. Na osnovu pomenutog, prikazane su matrice koje se izvede prema višekriterijumskoj analizi koju je predstavio Deng (1999). Prvo se pravi matrica kriterijuma u odnosu na cilj, zatim matrica u kojoj se ocenjuju podkriterijumi, pa matrica u kojoj se ocenjuju alternative i, naposljetku, matrica odluke i matrica

performansi iz koje se, u krajnjem koraku proračuna ,defazifikacijom dobijaju konačne vrednosti „težina“ alternativa, čiji je zbir jednak broju 1.

Ocenjivanje kriterijuma

Postupak rangiranja započinje određivanjem važnosti kriterijuma u odnosu na cilj, tj. u odnosu na postavljeni problem. Pomoću FAHP skale matrica procene kriterijuma se definiše na sledeći način:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mm} \end{bmatrix}$$

Kako je već pomenuto (poglavlje II-3.7.2 i II-3.7.3), treba napomenuti da je $a_{ij} = 1$ za sve $i = j$, ($i, j = 1, 2, \dots, m$) i da je $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$.

Ocenjivanje podkriterijuma

Za zadati kriterijum C_j , koji se sastoji od k_j podkriterijuma, potrebno je utvrditi relativan značaj podkriterijuma u zavisnosti od kriterijuma. Na osnovu toga, matrica procene se definiše na sledeći način:

$$A_j = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k_j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2k_j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k_j1} & a_{k_j2} & \dots & a_{k_jk_j} \end{bmatrix}$$

Ocenjivanje alternativa

U ovom koraku se ocenjivanje alternativa vrši poređenjem parova od N alternativa u odnosu na svaki od K podkriterijuma. Na taj način dobijamo ukupno K matrica sledeće forme:

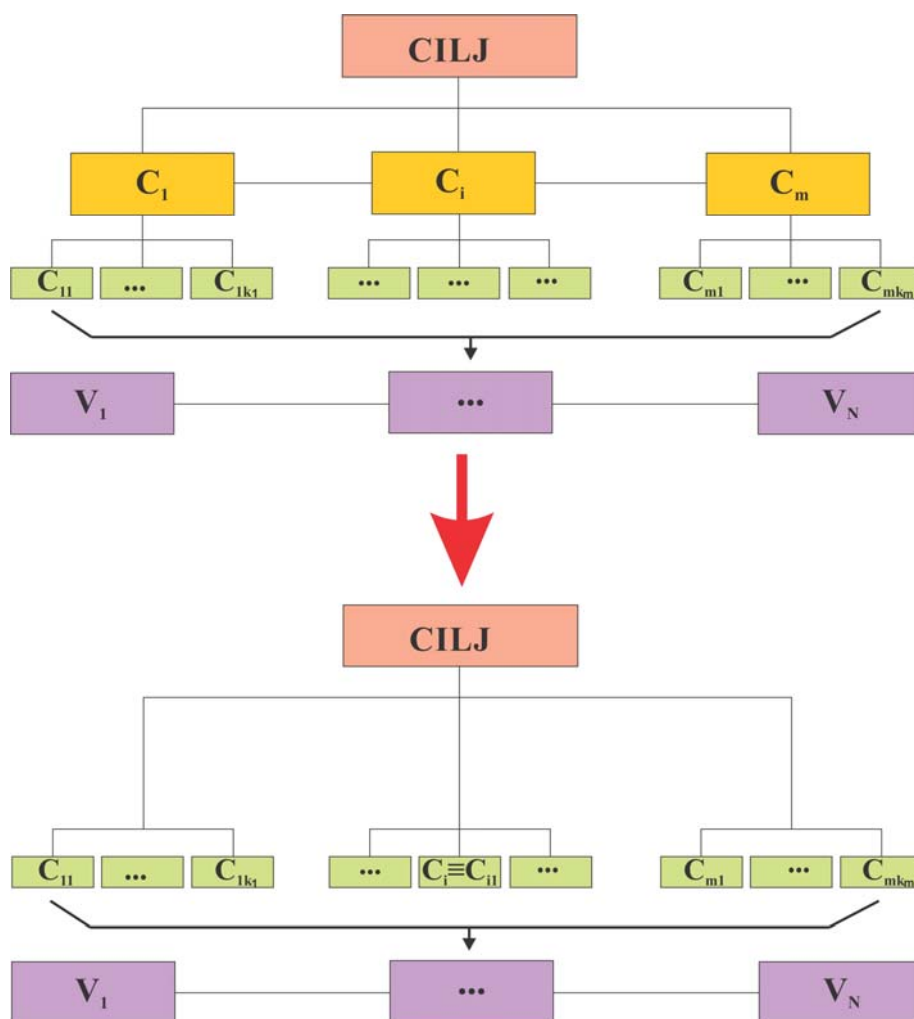
$$Y_k = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{NN} \end{bmatrix}$$

gde je $k = 1, 2, \dots, K$.

Korak 3. Korišćenje principa agregacije, kada postoje podkriterijumi, i izvođenje proračuna, kako bi se postavili u jedinstveni nivo kriterijumi i podkriterijumi. Princip agregacije se ogleda u sledećem: neka se postavi skup od m kriterijuma $C_1, C_2, \dots, C_m$, gde svaki od tih kriterijuma ima podkriterijume. Ako je k_j broj podkriterijuma u odnosu na j -ti kriterijum, ukupan broj podkriterijuma je:

$$K = \sum_{j=1}^m k_j$$

Kriterijumi ne moraju uvek nužno imati podkriterijume, ali u slučaju da oni postoje, poseban značaj ima princip agregacije. Po ovom principu kriterijumi i podkriterijumi se objedinjuju pomeranjem kriterijuma na nivo podkriterijuma, a tada „nestaje“ jedan nivo. Princip agregacije je ilustrativno prikazan na slici II-3.26.



Slika II-3.26: Princip agregacije - agregacija nivoa kriterijuma i podkriterijuma

Korak 4. Određivanje vrednosti težina (vektora težinskih prioriteta) koje se vrši korišćenjem fazi stepene analize (Chang, 1996), uz napomenu da se to može definisati i preko fazi aritmetike, tj. korišćenjem principa proširenja, koji je opisan u poglavlju II-3.3.3. U slučaju prvog postupka, prema definisanim matricama iz **koraka 1**, vrednosti težinskih prioriteta se definišu pomoću obrazca za određivanje fazi sintetičkog stepena za matrice kriterijuma, koji je prikazan kod metode fazi optimizacije prema Chang-u (1996) - **korak 2**. Na osnovu toga, proračunavaju se i vrednosti težinskih prioriteta:

$$w_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} \otimes \left[\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m a_{kl} \right]^{-1}$$

gde je $i = 1, 2, \dots, m$

Svi dobijeni vektori težinskih prioriteta - w_i se mogu normalizovati fazi aritmetikom ili principom proširenja opisanom u poglavlju II-3.3.3, koji ima prednost, jer se njegovim korišćenjem smanjuje neizvesnost (Deng, 1999).

Za matrice podkriterijuma vektori težinskih prioriteta podkriterijuma u odnosu na posmatrani kriterijum računaju se, takođe, preko fazi stepene analize (Chang, 1996).

Konačne vrednosti težine podkriterijuma se izvode na osnovu principa agregacije na ta dva nivoa: množenjem vektora težinskih prioriteta podkriterijuma sa odgovarajućim vektorima težinskih prioriteta kriterijuma:

$$w'_j = \left(\sum_{l=1}^{k_j} a_{il} \otimes \left[\sum_{i=1}^{k_j} \sum_{l=1}^{k_j} a_{il} \right]^{-1} \right) \otimes w_j$$

gde je $j = 1, 2, \dots, m$; $p = 1, 2, \dots, k_j$

Drugim načinom napisano, a uzimajući u obzir princip agregacije, težine podkriterijuma sa ukupnom „dužinom K“ mogu se predstaviti kao:

$$W = \left(w_1^1, w_1^2, \dots, w_1^{k_1}; w_2^1, w_2^2, \dots, w_2^{k_2}; \dots; w_j^1, w_j^2, \dots, w_j^{k_j}; \dots; w_m^1, w_m^2, \dots, w_m^{k_m} \right)$$

i, naposletku, pojednostavljeno:

$$W = (W_1, W_2, \dots, W_K).$$

Kod matrica alternativa sledi korak u kom se ponovo vrši fazi stepena analiza (Chang, 1996), a određivanje ocene performansi alternativa $V_i (i = 1, 2, \dots, N)$ u odnosu na j podkriterijuma ($j = 1, 2, \dots, K$) se izračunava na sledeći način:

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^K a_{ik} \otimes \left[\sum_{l=1}^N \sum_{m=1}^N a_{lm} \right]^{-1}$$

gde su $i = 1, 2, \dots, N$; $j = 1, 2, \dots, K$.

Korak 5. Nakon definisanja i proračuna matrica kriterijuma, podkriterijuma i alternativa i izračunatih vektora težinskih prioriteta vrši se proračun fazi matrica odluke i fazi matrica performansi.

Fazi matrica odluke dobija se na osnovu proračuna fazi stepene analize iz **koraka 3** za alternative:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1K} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{N1} & x_{N2} & \dots & x_{NK} \end{bmatrix}$$

Fazi matrica performansi

Ukupni učinak svake alternative kroz sve podkriterijume predstavlja se fazi matricom performansi, koja se dobija množenjem svih vektora težinskih prioriteta podkriterijuma sa elementima matrice odluke:

$$Z = \begin{bmatrix} x_{11} \otimes W_1 & x_{12} \otimes W_2 & \dots & x_{1K} \otimes W_K \\ x_{21} \otimes W_1 & x_{22} \otimes W_2 & \dots & x_{2K} \otimes W_K \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{N1} \otimes W_1 & x_{N2} \otimes W_2 & \dots & x_{NK} \otimes W_K \end{bmatrix}$$

Korak 6. Korišćenjem osnovnih operatora fazi skupova, koji su detaljno opisani u poglavlju II-3.3, kao i sumiranjem elemenata iz redova fazi matrice performansi, dobijaju se konačne vrednosti alternativa u vidu trougaonog fazi broja:

$$F_i = \sum_{j=1}^K x_{ij} \otimes W_j$$

Korak 7 - defazifikacija i rangiranje alternativa. Defazifikacija se vrši metodom koja je opisana kod trougaonih fazi brojeva u poglavlju II-3.4., dok optimalnu alternativu čini alternativa sa najvećim težinskim koeficijentom, a čiji je zbir jednak jedinici, kada se sumiraju težine svih alternativa.

Korak 8 . Na kraju se mogu odrediti i težine alternativa, uvodeći optimizacioni indeks λ računanjem vrednosti „ukupnog integrala“ - I (eng. „the total integral value“), koji izražava stav eksperta prema riziku (Liou & Wang, 1992; Kwang & Lee, 1999):

$$I = \frac{(d\lambda + s + (1-\lambda)l)}{2}, \quad \lambda \in [0,1]$$

Elementi l , s i d iz prethodnog izraza čine parametre trougaonog fazi broja (slika II-3.24). Kada je u pitanju optimizacioni indeks, njegova veća vrednost ukazuje na veći stepen optimizma, a kako ističu pomenuti naučnici obično se za proračune uzimaju sledeće vrednosti: „0“ za pesimistički stav eksperta, „1“ za optimistički stav, a „0.5“ se koristi kao umerena vrednost.

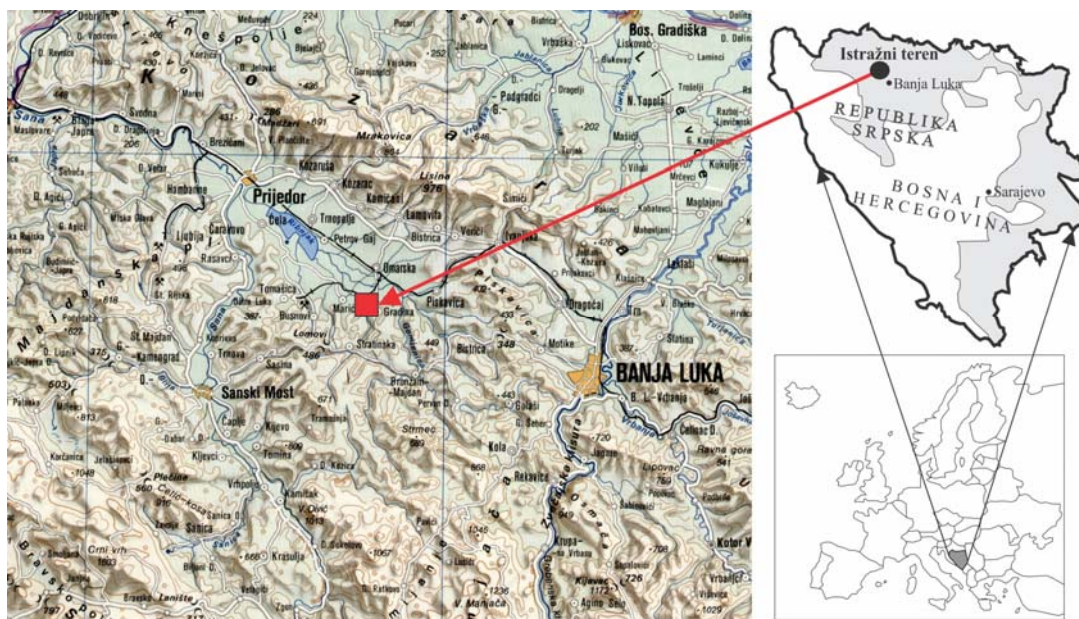
III. EKSPERIMENTALNI DEO, REZULTATI I DISKUSIJA

U cilju razvoja metodologije povodom rešavanja problema vezanih za odbranu od podzemnih voda, istraživanjima je bio obuhvaćen teren limonitskog rudnog ležišta „Buvač“, koji se nalazi u Bosni i Hercegovini. Istražni teren predstavlja praktični primer primene metode hidrodinamičke analize - modeliranja režima podzemnih voda, kao i fazi logike - fazi kriginga i fazi optimizacije. Primenom fazi kriginga procenjena su polja vrednosti koeficijenta filtracije koji su uneti u hidrodinamički model, dok je metodom hidrodinamičkog modeliranja definisan sistem odbrane od podzemnih voda i njegove karakteristike na području površinskog kopa „Buvač“, a zatim, primenom proračuna metode fazi optimizacije utvrđen je optimalan sistem.

1. Izbor i karakteristike eksperimentalnog područja istraživanja - površinski kop „Buvač“

U ovom delu doktorske disertacije prikazana su obavljena istraživanja u cilju lakšeg sagledavanja i razumevanja hidrodinamičkog modela, te su u model „uneti“ svi podaci dobijeni tokom dugogodišnjih istraživanja na području površinskog kopa „Buvač“, a to su: opšti - fizički podaci, hidrološki podaci, geološki podaci i hidrogeološki podaci.

Ležište limonita na kome je formiran površinski kop „Buvač“ nalazi se u Republici Srpskoj i pripada severoistočnom delu Ljubijske metalogenetske oblasti, a na slici III-1 prikazan je i njegov geografski položaj. Ležište „Buvač“ zauzima jugoistočni rubni deo ležišta mineralnih sirovina „Omarska“, koje, pored površinskog kopa „Buvač“, sadrži još i površinske kopove „Jezero“ i „Mamuze“, udaljene međusobno oko 500 m (slika III-3). Ležište „Omarska“ leži u morfološkoj depresiji Prijedorskog polja, koje se prostire pravcem jugoistok - severozapad, sa prosečnom širinom 5 - 10 km i dužinom oko 20 km. Severnu granicu Prijedorskog polja čine obronci Kozare, pregrađujući prijedorsku kotlinu od posavske doline i dna panonskog basena. Na južnom, jugozapadnom i zapadnom obodu teren se postepeno uzdiže sve do planine Grmeč, na levoj obali reke Sane, i planine Manjače, na desnoj obali reke Sane, dok je prema severnoj strani teren otvoren. Površinski kop „Buvač“ zahvata površinu od oko 3 km².



Slika III-1: Geografski položaj istražnog područja - površinski kop „Buvač”

1.1. Klimatske, hidrografske i hidrološke karakteristike istražnog područja

Na širem delu istražnog područja nalaze se meteorološke stanice „Gradina“ i „Prijedor“. Karakteristične vrednosti padavina za kišomernu stanicu „Gradina“ u periodu od 1958. do 1972. godine su: srednje godišnje količine padavina iznose 998 mm, minimalne mesečne količine padavina iznose 7 mm, a maksimalne mesečne količine padavina su vrednosti od 238 mm. Na kišomernoj stanici „Prijedor“ u periodu od 1935. do 2003. godine maksimalna godišnja količina padavina, registrovana 1937. godine, iznosila je 1357 l/m^2 , dok je apsolutni minimum godišnje količine padavina, koji je registrovan 2003. godine, iznosio $644,9 \text{ l/m}^2$.

Detaljniji pregled padavina prikazan je u okviru izrade prvog hidrodinamičkog modela (slike III-16 i III-17), a noviji podaci prikupljeni su u periodu od 2008. do 2012. godine, predstavljajući pritom ulazne podatke za inovirani hidrodinamički model (slika III-31).

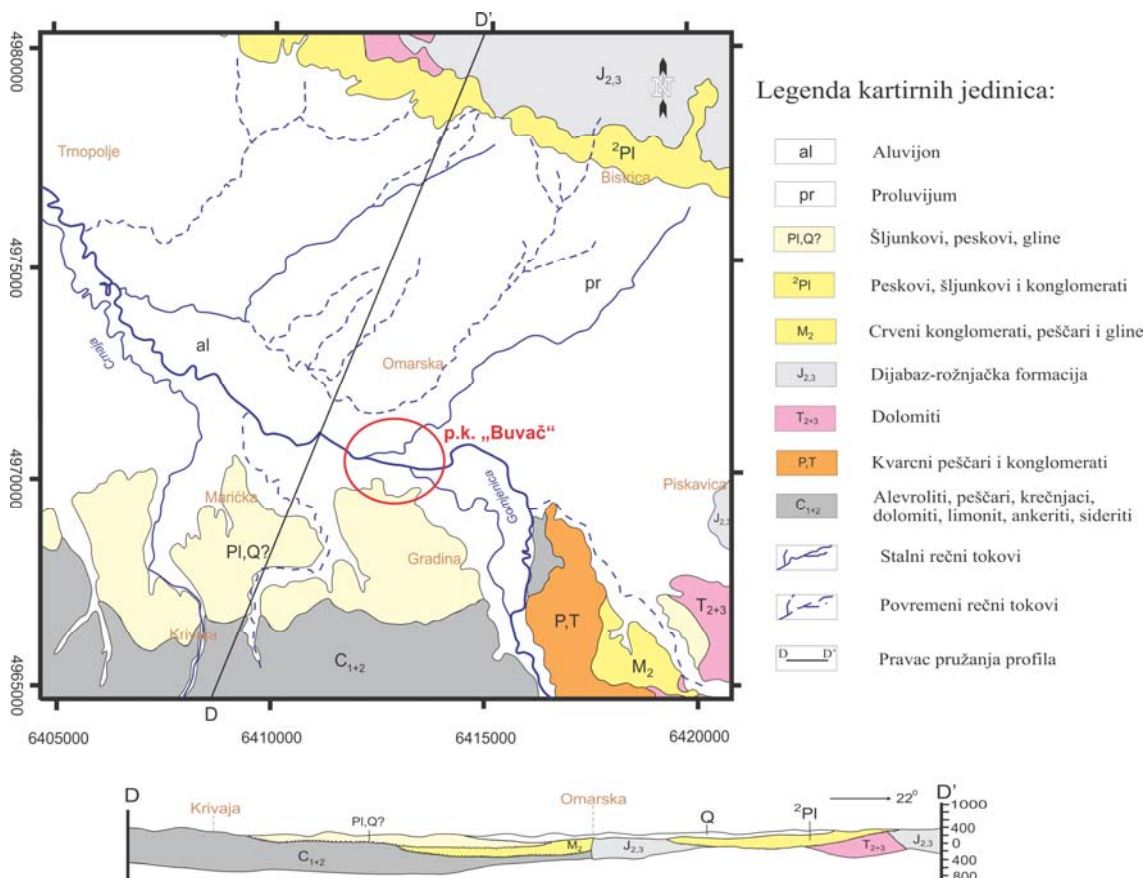
Celo polje šireg područja površinskog kopa „Buvač“ je ispresecano gustom mrežom vodotoka, a iz mreže vodotoka koji presecaju teren izdvaja se svojom veličinom reka Gomjenica, desna pritoka Sane, pokazavši veliki značaj u hidrološkom smislu, s

obzirom na to da protiče kroz područje površinskog kopa „Buvač”, tako da sa svojom pritokom Bistricom predstavlja problem u domenu zaštite površinskog kopa od površinskih voda. Izvorište Gomjenice se nalazi na severu Zmijanja, na nadmorskoj visini od 570 m, a ušće ove reke nalazi se 2 km uzvodno od Prijedora, na nadmorskoj visini od 135 m. Dužina reke iznosi 56,7 km, a površina sliva iznosi 752 km², sa prosečnim padom od 8‰. Prosečna kota terena u dolini na području budućeg kopa je 157 m.n.v., dok je kota najviše tačke u slivu Gomjenice je 854 m.n.v., a kota terena kod ušća Gomjenice u Sanu iznosi 134 m.n.v. Vodostaji reke Gomjenice prikazani su na slikama III-16 i III-17, za period od 1971. do 1973. godine, a na slici III-27 prikazani su vodostaji za period od 2011. do 2012. godine.

Reka Gomjenica preseca područje budućeg površinskog kopa „Buvač” u njegovom južnom delu, približno po pravcu istok - zapad, dok njena pritoka Bistrica preseca isto područje približno dijagonalno u pravcu severoistok - jugozapad. Pre eksploatacije rude predviđeno je izmeštanje Gomjenice, tako da će se novo korito nalaziti izvan severnih kontura kopa. 2009. godine dolazi do izmeštanja korita reka Gomjenice i Bistrice u nova korita u okviru aluvijona (peskovi i šljunkovi), dok uslovi prihranjivanja izdani na istražnom području ostaju isti. Zahvaljujući izmeštanju, reka Bistrica se uliva u novo korito reke Gomjenice sa severne strane kontura površinskog kopa „Buvač“. 2015. godine se radom sistema odbrane od podzemnih voda deo korita Gomjenice ponovo izmešta u novo korito (slika III-21).

1.2. Geološke karakteristike istražnog područja

U geološkoj građi ležišta „Buvač” učestvuju stene karbonske starosti, koje su predstavljene klastičnim stenama: uškriljenim alevrolitima, glincima i peščarima; dok se u manjoj meri javljaju karbonatne stene kao što su: krečnjaci, dolomiti i ankeriti. Preko karbonskih naslaga diskordantno leže pliocensko, tj. kvartarni sedimenti promenljive debljine, od nekoliko metara do stotinu metara, predstavljeni uglavnom raznobojnim glinama i kvarcnim peskovima. Na slici III-2 data je geološka karta i geološki profil šire zone površinskog kopa „Buvač“.



Slika III-2: Geološka karta šire zone površinskog kopa "Buvač"

Donji i srednji karbon (C₁₊₂): najvećim delom su karbonske naslage predstavljene klastičnim stenama, a u znatno manjoj meri javljaju se karbonatne stene. Ovom stratigrafskom članu pripadaju i sideritska i limonitska rudna tela, a zbog litološke sličnosti nije moguće međusobno odvojiti donji i srednji karbon.

Klastične naslage u vidu tamnoplavih karbonskih sedimenta predstavljene su slabo uškrljenim alevrolitima, glinenim škriljcima i sitnozrnim peščarima grauvalnog, ali i subgrauvalnog tipa, nalazeći se ispod glinovitih naslaga pliocensko-kvartarnih naslaga, a valja napomenuti da su najzastupljeniji alevroliti. U višim nivoima, u zonama kontakta sa naslagama krovine, ove stene su najčešće trošne i raspadnute, naročito ako imaju povišen sadržaj glinovitog veziva. Bitna karakteristika ovih naslaga je učestala bočna i vertikalna izmena pojedinih litoloških članova, pa su pri interpretaciji geološke građe na profilima neretko prikazivani bez razdvajanja na pojedine litološke članove.

Karbonatne stene su manje zastupljene od klastičnih sedimenata i nalaze se uglavnom u podinskim delovima rudnog tela. Značaj karbonskih karbonatnih naslaga u Ljubijskoj metalogenetskoj oblasti vidna je u tome što su za njih vezana primarna ležišta ruda gvožđa, koja su predstavljena krečnjacima, dolomitima i ankeritima. Ove stene nemaju kontinuirano rasprostranjenje, već se javljaju u vidu nepravilnih sočiva unutar klastičnih stena. Boja krečnjaka se najčešće kreće od sive do sivoplave boje, pritom, masivne teksture. Krečnjaci su ispresecani mrežom pukotina zapunjenih kalcitom, ankeritom ili sideritom, a pojedini delovi krečnjačkih masa su brečoliki, s mestimičnim prelazom u krečnjačke breče. Boja dolomita i dolomitičnih krečnjaka je na svežem prelomu svetle boje, a zbog zastupljenosti gvožđa poprimaju žutomrku boju. Ankerit je svetlosive boje sa karakterističnim raspadanjem sličnim raspadanju dolomita, a sadrži terigena zrna kvarca, muskovita i pirita, dok je sadržaj gvožđa u njemu relativno nizak. Zahvaljujući mnoštvu ostataka mikroflore i mikrofaune, treba napomenuti da je sa sigurnošću određena karbonska starost.

Sideritsko-limonitske naslage, u kojima je primarna stena ovog člana siderit, najčešće su sive boje, sitnozrni do krupnokristalasti, masivni ili pak sa loše izraženom slojevitošću. Takođe, siderit može biti i znatnim delom sekundarno pretvoren u šupljikavi i kompaktni limonit, koji se javlja u ovom članu kao ravnopravni sastavni element njegove parageneze. Limonitska rudna tela su nastala procesima oksidacije gornjih delova sideritskih rudnih tela, a najzastupljeniji produkt oksidacionih procesa je limonit, kao mikroporozna šupljikava rudna masa, koja je zbog apsorpcije velikih količina podzemnih voda neretko trošna i zemljasta. Takođe, jednim delom se limonit javlja u formi kompaktnih, mikroporoznih agregata, zajedno sa getitom, lepidokrokitom i hematitom. Osim što predstavlja glavnu komponentu limonitne rude, getit se pojavljuje i kao samostalni mineral unutar rudne mase, dok se limonit neretko pojavljuje i kao cement u rudnim brečama ili pak kao impregnacija u klastičnim stenama. U povlati sideritsko-limonitskim naslagama nalaze se karbonske ili pliocensko-kvartarne naslage, a u podini se nalaze isključivo karbonske stene. Granice sideritsko-limonitskih naslaga sa klastičnim naslagama su uglavnom oštre i jasno izražene, dok su granice sa karbonatnim stenama postupne.

Permo-trijaske (P₃T) naslage čine mase crvenih i sivih kvarcnih peščara, konglomerata i škriljaca, nastalih u izolovanim prostorima između paleogeografski izdignutih karbonskih tvorevina.

Trijaske (T) naslage se odlikuju facijalnom raznovršnošću, sačinjene od krečnjaka i dolomita, vulkanogeno-klastičnih naslaga i karbonatno-klastičnih naslaga. Dolomiti, kao najzastupljeniji među navedenima, taloženi su kroz čitav srednji i gornji trijas.

Jurski (J_{2,3}) sedimenti su predstavljeni smeđim krečnjacima slabe slojevitosti.

Miocenske (M) tvorevine predstavljene su: crvenim peščarima, konglomeratima i glinama; a pritom su značajni nosioci mrkog uglja.

Pliocen-kvartarna (Pl,Q) serija sedimenata, koja predstavlja povlatu limonitnim rudnim telima, izgrađena od raznobojnih peskovitih i masnih glina: sivožutih, crvenkastih, sivih i tamno-sivih glina, kao i sitnozrnih kvarcnih peskova, slojeva šljunka i slojeva i proslojaka uglja i ugljevitih glina. Ritmičnost izmena ovih sedimenata, kao i lateralna promenljivost, ukazuju da se radi o jezerskoj sedimentacionoj sredini sa izraženim reljefom podloge.

Kvarcni peskovi i šljunkovi područja ležišta mineralnih sirovina „Buvač” se najčešće pojavljuju zajedno i čine jedinstven sloj. Na području površinskog kopa ”Buvač” mogu se izdvojiti tri karakteristična horizonta na kojima se pojavljuju šljunkovito-peskoviti slojevi i to na: 140-150 m.n.v., 120-130 m.n.v. i 100-110 m.n.v. Na nivou 140-150 m.n.v. pesak se pojavljuje u vidu sočiva i proslojaka u šljunku ili, češće, kao podina šljunku. Manji deo peska se nalazi u zasebnim slojevima ograničenim slojevima gline. Najčešća debljina slojeva kvarcnog peska je 1,5 do 4 m. Na nižim nivoima ležišta od 120-130 m.n.v. i 100-110 m.n.v. kvarcni pesak, takođe, alterira bočno i vertikalno sa šljunkom ili peskovitim šljunkom. Na nivou 120-130 m.n.v., prema severnim granicama ležišta, preovlađuje šljunak nad peskom, dok se na nivou od 100-110 m.n.v. kvarcni pesak nalazi u severnom delu, a manje u zapadnom delu površinskog kopa.

Glinoviti sedimenti na prostoru „Buvača“ su sastavni deo pliocenske serije glinovito-peskovitih sedimenata, koja je razvijena na području Prijedorsko-Omarskog neogenog basena. Njihova starost je označena kao pliocensko-kvartarna, usled nemogućnosti razdvajanja pliocena i kvartara. Gline su predstavljene raznovrsnim varijetetima: od čistih masnih glina do peskovitih glina i, naposljetku, jako peskovitih glina; kao i raznim varijetetima u boji: od sivih, tamnosivih, sivožutih, sivocrvenih, crvenih, žutih varijeteta, pa sve do šarenih varijeteta. Pored toga, značajno je učešće i manje ili više ugljevitih glina kao posebnog varijeteta. Peskoviti varijeteti glina su zastupljeniji od masnih varijeteta glina, čije je procentualno učešće oko 10%, a izražena je vertikalna i lateralna izmena raznih varijeteta glina. Tako sive masne gline na kratkim rastojanjima prelaze u sive-peskovite, sive-ugljevite, tamnosive peskovite ili tamnosive masne gline. Prosečna debljina sivih, sivožutih i sivocrvenih masnih glina je oko 2 m, a masne gline se javljaju kao izolovana sočiva u masi ostalih varijeteta glina. Po svom mineraloškom sastavu ove gline predstavljaju asocijaciju minerala ilita, montmorionita, kaolinita, kvarca i plagioklasa, gde je prosečno učešće kaolinita oko 20%.

Pretaloženi prašinsti i zaglinjeni limonit na području površinskog kopa „Buvač“ se javlja u vidu izduženih sočiva i slojeva, u kojima čini oko 17% ukupne mase oksidnih ruda. U povlati pretaloženog limonita nalaze se pliocensko-kvartarne tvorevine, a u podini se nalaze karbonske ili pliocensko-kvartarne, zavisno od toga da li su taloženi direktno na paleoreljefu ili su interstratifikovani u pliocensko-kvartarnim naslagama. Granice pretaloženog prašinastog limonita sa okolnim stenama su različite, a najčešće su postupne, dok se u pojedinim delovima rudnih tela pojavljuju proslojci glina.

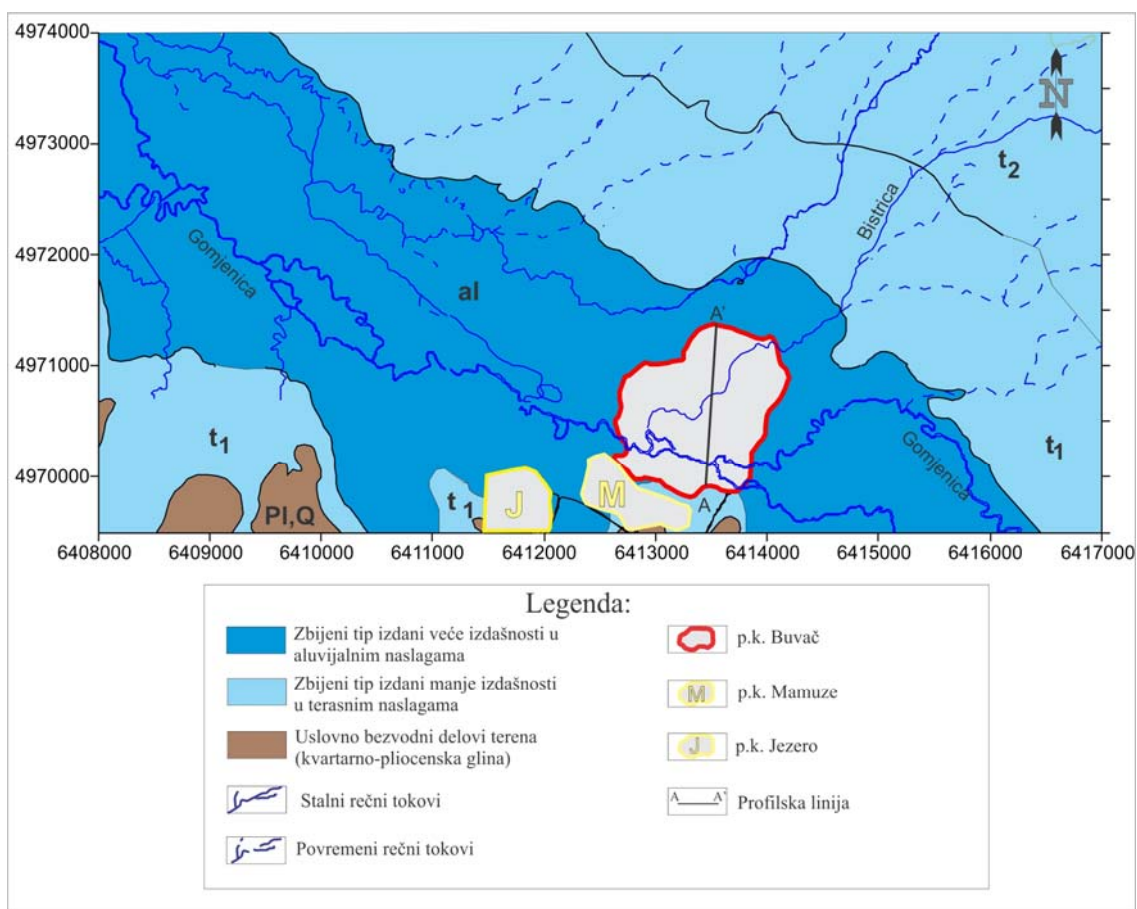
Kvartarne (Q) tvorevine su predstavljene eluvijalnim sedimentima, kao što je humus, aluvijalnim i proluvijalnim sedimentima, a to su: šljunkovi, peskovi, ilovače, zatim i lokalno organogeno-barskim sedimentima i, naposljetku, jezerskim sedimentima. Aluvijalni i proluvijalni sedimenti su debljine uglavnom od 5 m do 15 m, a samo mestimično preko 15 m, dok im je srednja debljina 9 m. Leže preko različitih sedimenata pliocensko-kvartarnih naslaga, alevrolita ili direktno preko rudnog tela.

1.3. Hidrogeološke karakteristike istražnog područja

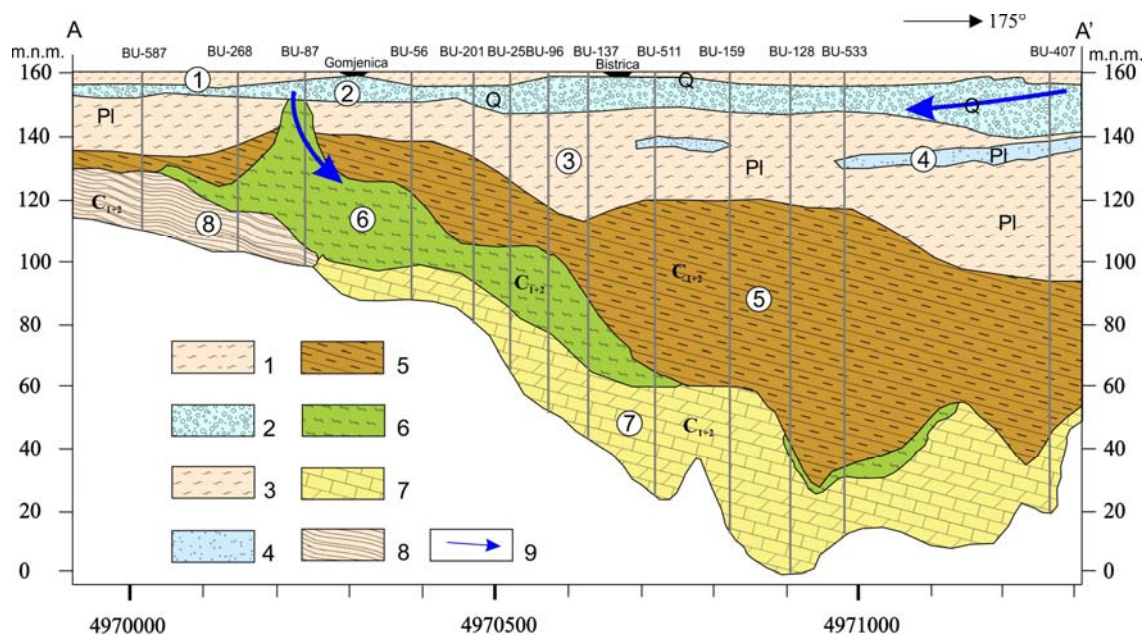
U okviru istražnog područja površinskog kopa „Buvač“ izdvojeni su sledeći tipovi izdani:

- zbijeni tip izdani veće izdašnosti u aluvijalnim naslagama i pliocenskim peskovima,
- zbijeni tip izdani manje izdašnosti u terasnim naslagama,
- izdan u rudnom telu,
- karstno-pukotinski tip izdani u karbonskim stenama i
- uslovno bezvodni delovi terena.

Na hidrogeološkoj karti (slika III-3) prikazane su granice rasprostranjenja kvartarnih naslaga, a na hidrogeološkom profu A-A' (slika III-4) su prikazani međusobni odnosi prisutnih izdani.



Slika III-3: Hidrogeološka karta istražnog područja - ležište „Buvač“



Legenda:

1. Kvartarne gline
2. Kvartarni šljunak (aluvijalna izdan)
3. Pliocenske gline
4. Pliocenski pesak (pliocenska izdan)
5. Karbonski zaglinjeni peščari,
6. Karbonski limonit (izdan u rudnom telu)
7. Karbonski karstifikovani krečnjaci i dolomiti, siderit i ankerit (karstna izdan)
8. Karbonski zaglinjeni peščari i alevroliti i kompaktni kalciti
9. Generalni smer kretanja podzemnih voda

Slika III-4: Hidrogeološki profili istražnog područja - ležište „Buvač” (Polomčić & Bajić, 2015)

Zbijeni tip izdani veće izdašnosti u aluvijalnim naslagama i pliocenskim peskovima. Na širem području površinskog kopa „Buvač“ je formirana izdan zbijenog tipa u aluvijalnim šljunkovima sa slobodnim nivoom, a u pliocenskim peskovima su subarterska i arterska izdan. Povratne gline i ilovače pri visokim nivoima uslovljavaju subarterski karakter ove izdani, a u severnom delu istražnog terena aluvijalni šljunkovi mestimično leže preko slojeva peskova pliocena, usled čega su u hidrauličkom smislu povezani.

U povlati šljunkovito-peskovitog kompleksa leže ilovače i gline debljine od 1 m do 5 m. Podinu aluvijalnim sedimentima čine pliocensko-kvartarne naslage, a u području ležišta ispod aluvijona mestimično se nalaze raspadnuti alevroliti ili rudno telo. Ukupna debljina aluvijalnih naslaga je u proseku od 5 m do 15 m, a prosečna debljina pliocenskih

peskova je oko 10 m. Povlata aluvijalnih naslaga se kreće od 150 m.n.v. do 160 m.n.m, a podina šljunkovito-peskovitih u intervalu od 130 do 155 m.n.m. U pravcu severozapada debljina aluvijalnih naslaga raste, a u severnom delu dolazi do raslojavanja na dva ili tri šljunčano-peskovita sloja sa različitim dubinama zaleganja.

Na osnovu rezultata obrade probnih crpljenja, sprovedenih na bunarima aluvijalne izdani, proračunate vrednosti hidrogeoloških parametara su sledeće:

- koeficijent vodoprovodnosti: $T = 1.07 - 1.4 \times 10^{-3}$ do m^2/s
- koeficijent filtracije: $K = 1.19 - 1.46 \times 10^{-4}$ m/s
- efektivna poroznost: $\varepsilon =$ od 0.14 do 0.283.

Za pliocenske peskove vrednosti hidrogeoloških parametara su sledeće:

- koeficijent vodoprovodnosti: $T = 0,5 \times 10^{-3}$ m^2/s
- koeficijent filtracije: $K = 5 \times 10^{-3}$ m/s
- specifična izdašnost izdani: $\mu = 1 \times 10^{-3}$

Prihranjivanje podzemnih voda vrši se infiltracijom atmosferskih padavina u aluvijalne šljunkove, a zatim i pliocenskih peskova na severnom obodu polja. Drugi izvor prihranjivanja podzemnih voda aluvijalne izdani su površinski tokovi, a prevashodno reka Gomjenica, koja je na više mesta usekla svoje korito u aluvijalne šljunkove. Istražnim radovima je dokazano da na jednom manjem delu, koji čini površinu od oko 0.075 km^2 , aluvijalne naslage leže direktno preko limonitskog rudnog tela, stvarajući tako mogućnost direktne hidrauličke veze između izdani u rudnom telu i aluvijalnim šljunkovima. U ostalom delu aluvijalna izdan je odvojena od ostalih izdani pliocenskim glinama (slika III-4).

Zbijeni tip izdani manje izdašnosti u terasnim naslagama predstavljen je prvom i drugom terasom, a čine ih naslage peskova, šljunkova i gline, a nalaze se na istočnom i severoistočnom delu na hidrogeološkoj karti (slika III-3), a debljina terasnih sedimenata se kreće od 5 m do 10 m. U ovoj izdani nema osmatračkih objekata, pošto nema značaja za koncept odbrane površinskog kopa „Buvač“ od podzemnih voda.

Izdan u rudnom telu. U ovu grupu spadaju šupljikavi limonit sa visokim sadržajem gvožđa, kao i srednjezrni i sitnozrni lokalno zaglinjeni limonit. Podzemne vode u limonitskom rudnom telu nemaju značajno direktno prihranjivanje, tj. prihranjivanje infiltracijom od atmosferskih padavina, s obzirom na to da je mala površina terena na kojoj se rudno telo nalazi (0.125 m^2). Ova izdan se indirektno prihranjuje podzemnim vodama iz aluvijalnih, šljunkovito-peskovitih naslaga i naslaga pliocenskih peskova u delu ležišta, gde stupaju u kontakt, a delom i iz karbonatnih stena, koje se uglavnom nalaze u podini rudnog tela (slika III-4). Uzev u obzir položaj rudnog tela i njegov odnos prema vodonepropusnim stenama, formirana izdan je najvećim delom subarteskog karaktera, a srednja pijeziometarska visina je oko 80 m u odnosu na površinu terena.

Na osnovu rezultata probnih crpljenja na bunarima u rudnom telu prikazane su sledeće filtracione karakteristike:

- koeficijent vodoprovodnosti: $T = 6,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
- koeficijent filtracije: $K = 2,3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$
- specifična izdašnost izdani: $\mu = 2,3 \times 10^{-2}$.

Na osnovu podataka crpljenja vode iz iskopa rudarskog istražnog rada dobijene su sledeće vrednosti:

- koeficijent filtracije: $K = 5,5 - 6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$
- efektivna poroznost: $\varepsilon = 0,177$
- specifična izdašnost izdani: $\mu = 5 \times 10^{-2}$.

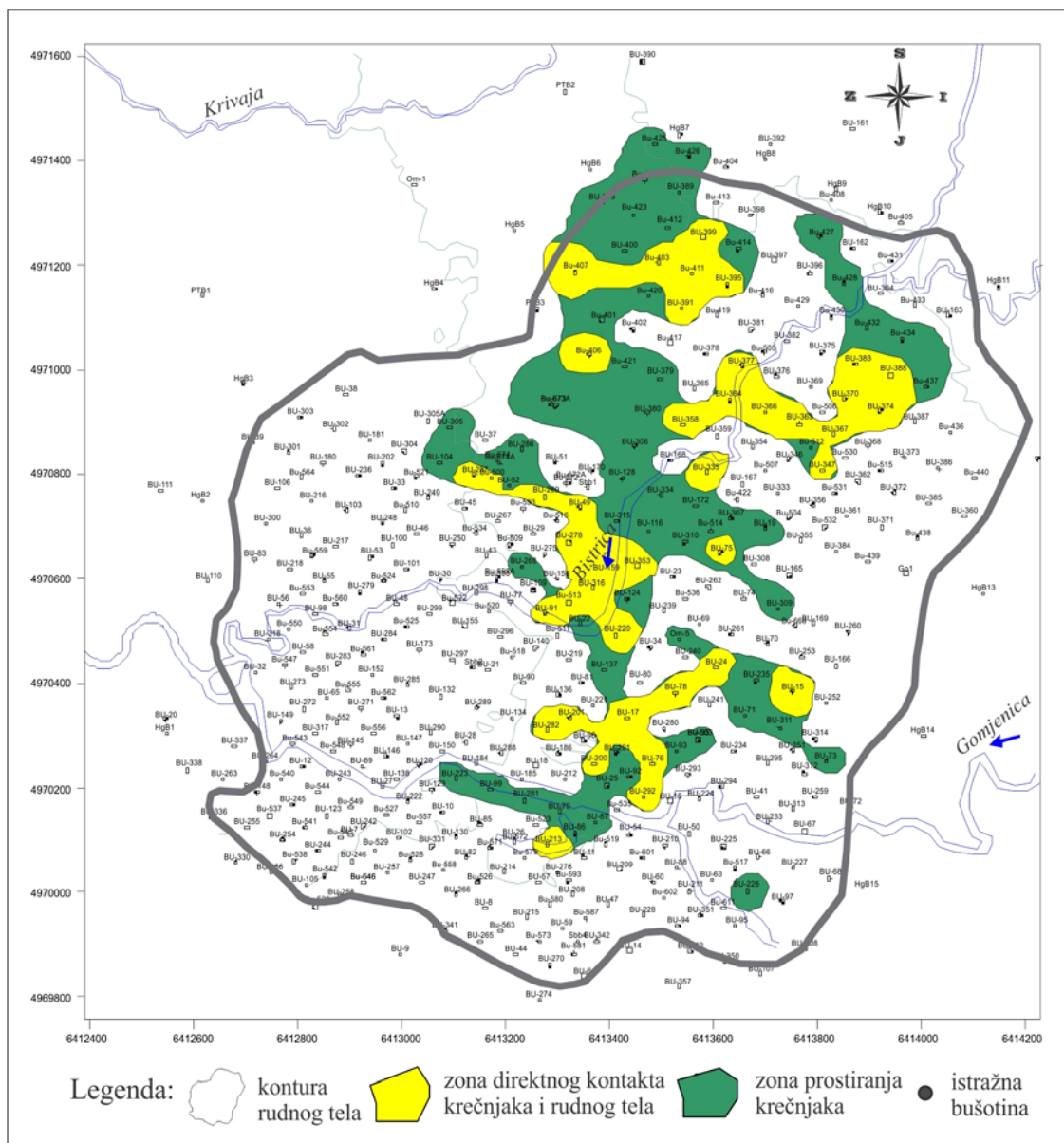
Karstna i pukotinska izdan. U stenama u koje spadaju uglavnom krečnjaci i dolomitični krečnjaci, kao i siderit i ankerit, formirana je izdan karstno-pukotinske poroznosti sa subarteskim nivoom. Prostranstvo ove izdani je značajno (oko 0.2 km^2), te je u njima akumuliran značajan deo podzemnih voda. Podzemne vode u karbonatnim stenama su u hidrauličkoj vezi sa podzemnim vodama u limonitskom rudnom telu (slika III-5), s tim da podzemne vode u karbonatnim stenama nisu detaljno ispitane. Prema severu krečnjaci i dolomitični krečnjaci, siderit i ankerit nisu ograničeni, tako da se ne može pouzdano reći

i odakle se sve prihranjuju podzemne vode u ovoj izdani. Pretpostavlja se da jedan deo voda dolazi sa južnog oboda, a postoji i mogućnost da su karbonatne stene povezane sa pliocenskim peskovima u severnom delu terena. Srednja pijezometarska visina se nalazi na oko 140 m u odnosu na površinu terena, dok je generalni tok podzemnih voda u smeru jugoistok - severozapad. Filtracione karakteristike su sledeće:

- koeficijent vodoprovodnosti: $T = 2,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
- koeficijent filtracije: $K = 1,04 \times 10^{-4} \text{ m/s}$
- specifična izdašnost izdani: $\mu = 2,58 \times 10^{-4}$.

S obzirom na to da je karstno-pukotinska izdan razmatrana kao jedinstvena izdan, u pojedinim delovima terena kojima pripadaju i rastrošeni i raspadnuti peščari, koji se javljaju zajedno sa razglinjenim alevrolitima u krovini i bokovima rudnog tela, konstatovane su nešto niže vrednosti koeficijenta filtracije. Tako je npr. konstatovano da je koeficijent filtracije peščara manji od $K = 1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$.

Uslovno bezvodnim delovima terena pripadaju: proluvijalne peskovite žute gline, pliocen-kvartarne ugljevit, sive, smeđe i crvene gline i pliocenske višebojne gline. Peskovite žute gline izgrađuju severni obod Prijedorskog polja iznad kote 160 m.n.m., a predstavljaju, u stvari, prvu i drugu paleoterasu reke Gomjenice i leže preko pliocenskih naslaga. U gornjem delu su gline sa proslojcima peskova i šljunkova debljine do 2 m, a u donjem delu su to jako zaglinjeni šljunkovi. Na prelazu iz pliocena u kvartar taložile su se šljunkovite i peskovite gline, mestimično ugljevit gline, sive gline, kao i smeđe i crvene gline. Na južnom obodu polja one imaju veliko prostranstvo, ležeći direktno preko paleozojskih naslaga. Debljina im je znatna, a kreće se od 10 m do 60 m, dok u većem delu rudnog polja gline čine njegovu povlatu. Pliocenske šarene gline, šljunkovite gline i konglomerati izgrađuju teren na severnom obodu polja, predstavljajući bočnu barijeru cirkulaciji podzemnih voda iz gornjotrijaskih krečnjaka, tako da su prilikom kontakta registrovani brojni izvori male izdašnosti (manji od 1 l/s).



Slika III-5: Prostiranje karstne izdani sa zonama hidrauličkog kontakta sa izdani u rudnom telu

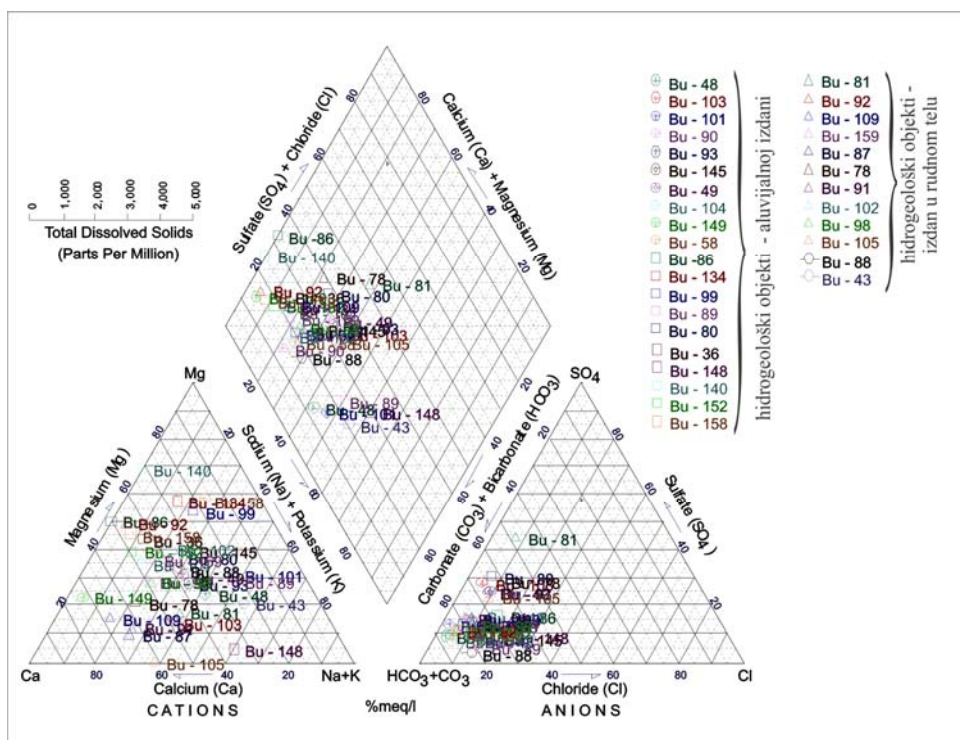
Hemijska svojstva podzemnih voda. Hemijske osobine podzemnih voda su analizirane na uzorcima zahvaćenim iz pijezometara i bunara izdvojenih izdani, a pritom su izdvojene osnovne grupe anjona i katjona, zatim i mineralizacija, pH vrednost i ukupna tvrdoća. Cilj prikazanih rezultata hemijskih analiza je u tome da se dokaže međusobna povezanost izdani na području površinskog kopa „Buvač“.

Na osnovu skraćenih hemijskih analiza prikazane su srednje vrednosti hemijskog sastava voda (tabela III-1), a rezultati ovih analiza ukazuju da podzemne vode na ispitanom terenu pripadaju hidrokarbonatnoj klasi, natrijumskoj grupi.

Tabela III-1: Hemijski sastav podzemnih voda na prostoru ležišta „Buvač“

A N J O N I (mg/l)			Ukпно	K A T J O N I (mg/l)			Ukupno
HCO ₃	Cl	SO ₄		Ca	Mg	(Na+K)	
421.6	26.6	35.06	483.26	46	22.5	97.7	166.2
mineralizacija		ph		ukupna tvrdoća			
649.46 mg/l		6.5		19.46 ° dH			

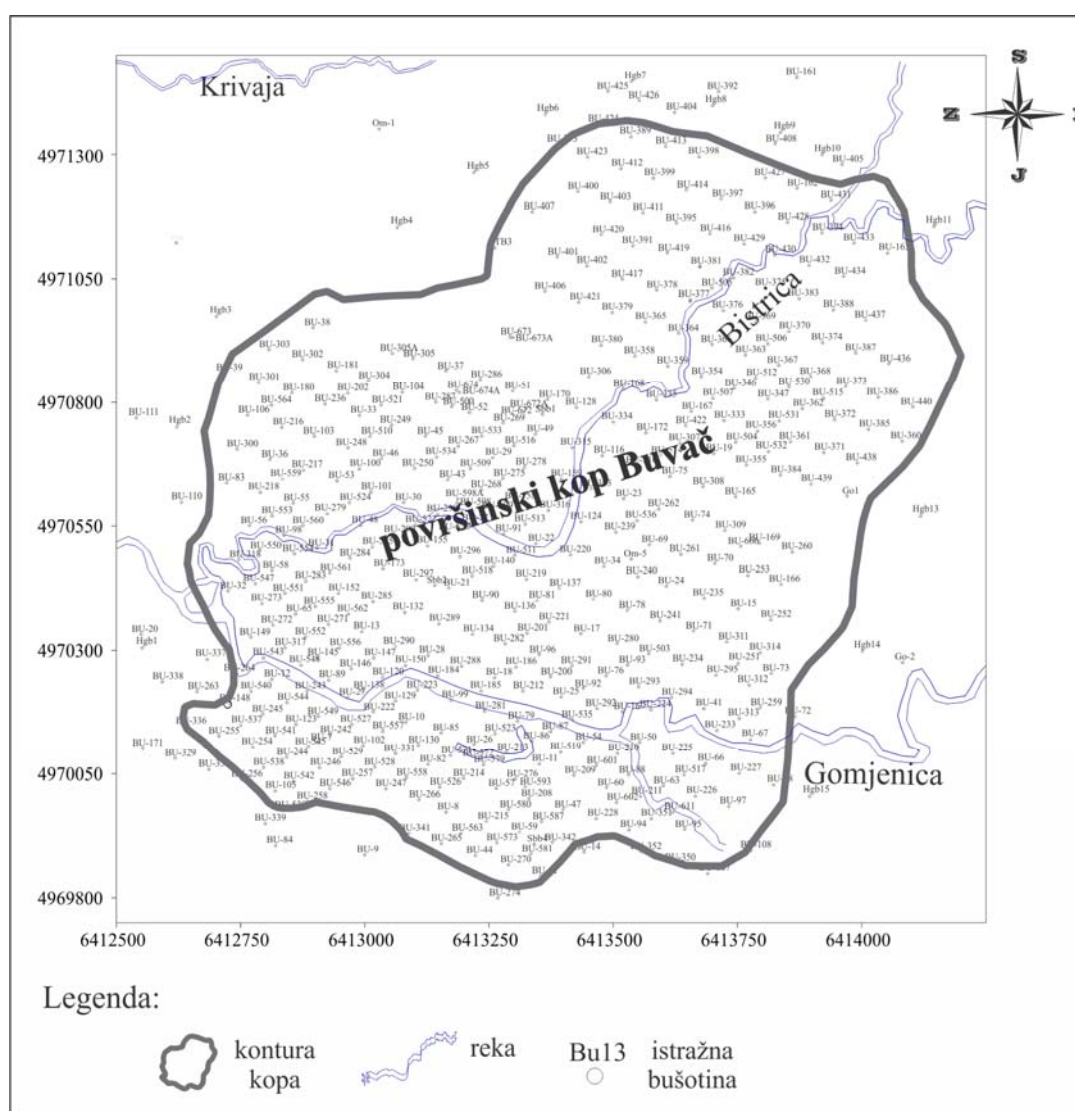
Anjonski i katjonski sastav, u vidu Piperovog dijagrama, uzoraka vode iz aluvijalne izdani i izdani u rudnom telu, prikazan je na slici III-6. Ukupno su uzeta trideset i dva uzorka, a rezultati hemijskih analiza pokazuju kako je sličan sastav voda iz svih izdani, pa se na osnovu toga može zaključiti da je ostvaren hidraulički kontakt između izdani.



Slika III-6: Piperov dijagram uzoraka podzemnih voda sa površinskog kopa „Buvač“

2. Hidrogeološki model površinskog kopa „Buvač“

Na prostoru istražnog područja izbušeno je preko 550 bušotina (slika III-7), neravnomerno raspoređenih, različitih dubina i dopiranja do različitih slojeva, koje su bile dobra osnova za izradu 3D hidrogeološkog modela površinskog kopa „Buvač“. Na osnovu kartiranja jezgra bušotina, utvrđene su litološke karakteristike stenskih masa. Dobijeni podaci predstavljali su kvalitetnu ulaznu osnovu za izradu modela, što je dalje implementirano prilikom formiranja 3D hidrogeološkog modela.



Slika III-7: Karta lokacija istražnih bušotina u okviru ležišta limonita „Buvač“

Na osnovu analize svih prikupljenih rezultata istraţnih geoloških i hidrogeoloških radova, što podrazumeva: istraţno bušenje i jezgrovanje, granulometrijske analize, testovi crpenja, kao i laboratorijskih ispitivanja, tj. hemijske analize, izrađen je hidrogeološki model leţišta „Buvač”.

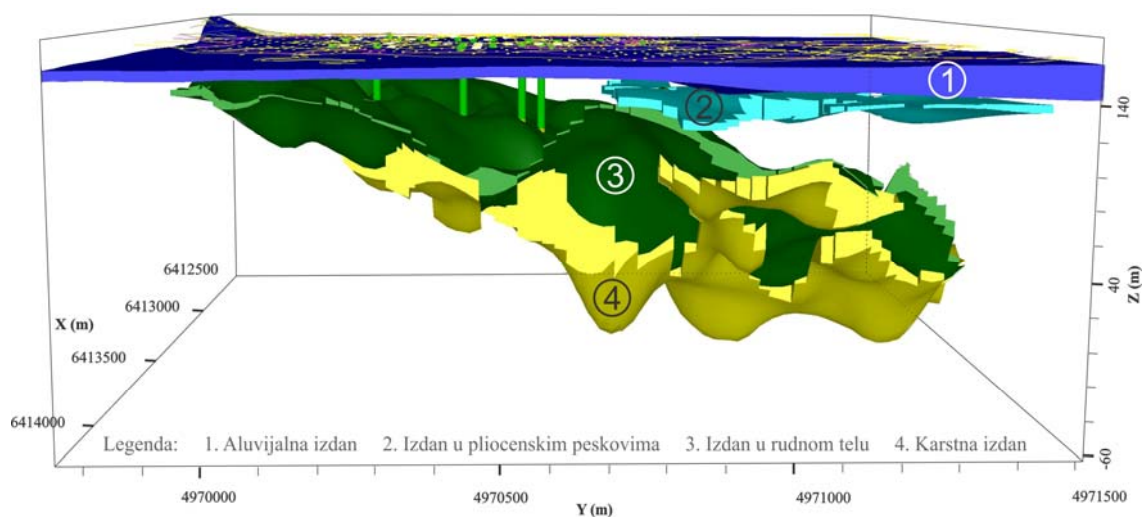
Vodeći se prikazanim hidrogeološkim karakteristikama terena (poglavlje III-1.3.), konceptualni model površinskog kopa „Buvač” se sastoji od ukupno osam slojeva, koji su prikazani u tabeli III-2.

Tabela III-2: Prikaz izdvojenih modelskih slojeva na površinskom kopu „Buvač”

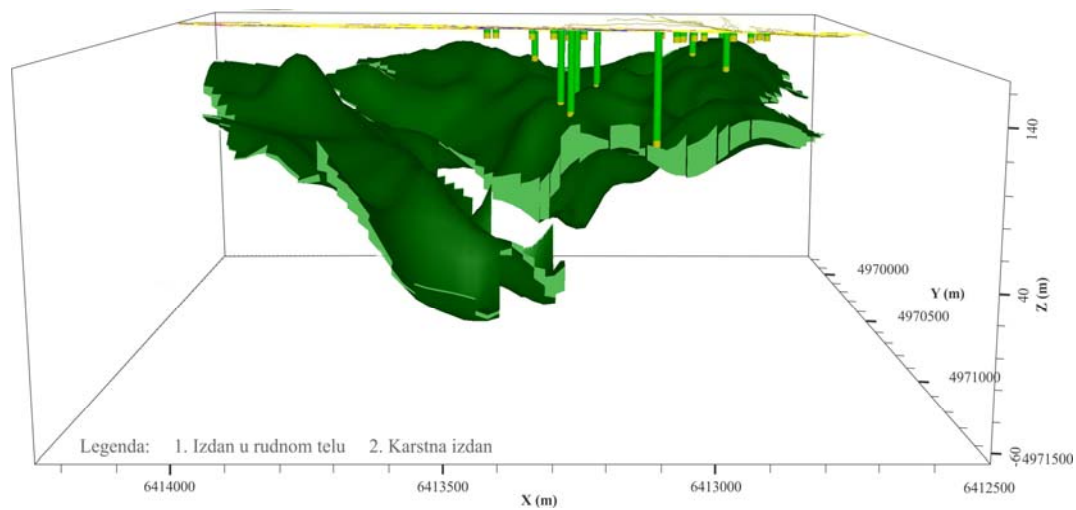
Br. sloja	Hidrogeološka funkcija sloja	Litostratigrafski članovi	
1	izolatorski sloj	povlatni glinoviti sedimenti	1
2	vodonosni sloj aluvijalna izdan	aluvijalni šljunkovi i peskoviti šljunkovi	2
3	uglavnom izolatorski sloj	gline i peskovite gline	3a
		deo izdani u okviru rudnog tela	3b
4	kombinovani izolatorsko-vodonosni sloj	gline i peskovite gline	4a
		peskovi i šljunkovi	4b
		deo izdani u okviru rudnog tela	4c
5	uglavnom izolatorski sloj	gline i peskovite gline	5a
		deo izdani u okviru rudnog tela	5b
6	uglavnom izolatorski sloj	zaglinjeni alevroliti sa pešćarima	6a
		deo izdani u okviru rudnog tela	6b
7	kombinovani vodonosno-izolatorski sloj izdan u rudnom telu	limonit i prašinast limonit	7a
		zaglinjeni alevroliti sa pešćarima	7b
		limonitsko rudno telo	7c
8	kombinovani vodonosno-izolatorski sloj izdan u karbonatnim stenama	krečnjaci i dolomitični krečnjaci, siderit i ankerit koje okružuju zaglinjeni alevroliti i alevroliti	8a
		zaglinjeni alevroliti i alevroliti	8b

Tokom poslednjih godina je načinjen veliki napredak u razvoju softvera u kojima se izrađuju hidrogeološki modeli. Za analizu i pripremu ulaznih podataka, kao što su koordinate položaja bušotina i kote izdvojenih slojeva, korišćen je program Microsoft Excel, dok je za prikaz samog 3D hidrogeološkog modela terena korišćen program Visual Modflow.

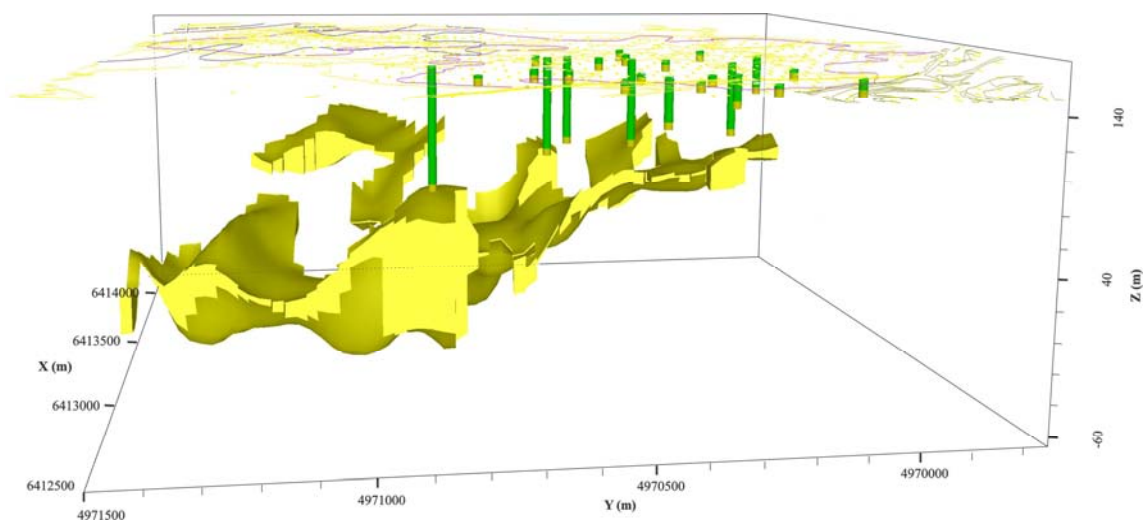
Na slici III-8 prikazan je prostorni raspored izdani na površinskom kopu „Buvač“ posmatran sa istoka, zatim na slici III-9 je prikazan prostorni raspored izdani u rudnom telu posmatrana sa severa, slika III-10 prikazuje izdan u karbonatnim stenama posmatrana sa zapada, dok je na slici III-11 prikazan međusobni odnos izdani u rudnom telu i izdani u karbonatnim stenama posmatranih sa istoka. Obuhvaćen teren zauzima prostor od oko 4 km² i dubine do oko 175 m, a 3D hidrogeološkim modelom terena dodata je još jedna dimenzija u istraživanju i interpretaciji hidrogeoloških radova. Ovaj način izrade modela zahteva dobro poznavanje hidrogeoloških karakteristika istražnog terena i programskih paketa, potom, posedovanje dosta znanja i veština, pa se kao rezultat rada dobija prava interpretacija rezultata.



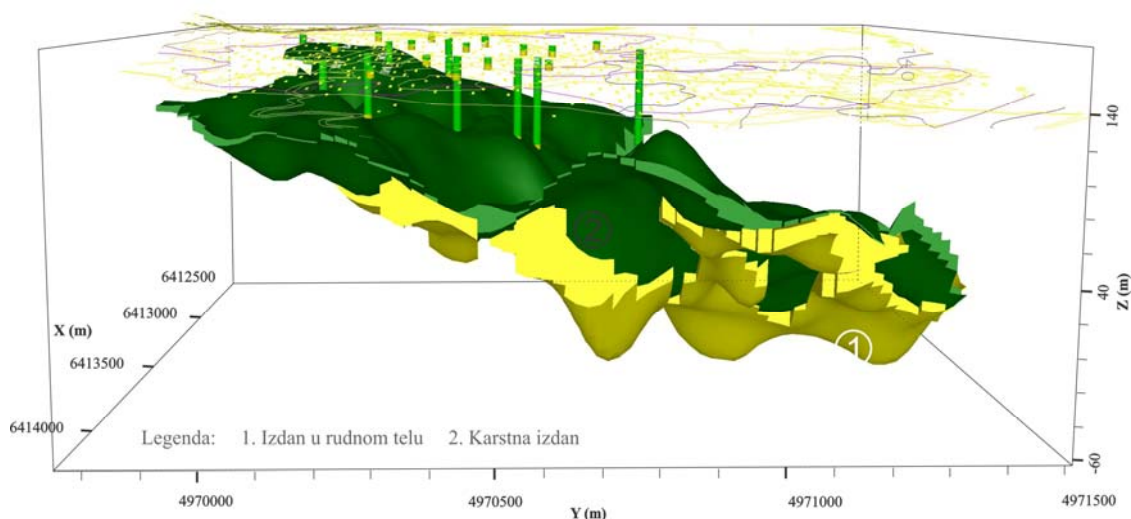
Slika III-8: Prostorni raspored izdani na površinskom kopu „Buvač“ (pogled sa istoka)



Slika III-9: Prostorni raspored izdani u rudnom telu „Buvač” (pogled sa severa)



Slika III-10: Prostorni raspored izdani u karbonatnim stenama (pogled sa zapada)



Slika III-11: Prostorni raspored izdani u karbonatnim stenama i rudnom telu „Buvač”
(pogled sa istoka)

3. Prvi trodimenzionalni hidrodinamički model režima izdani površinskog kopa „Buvač“

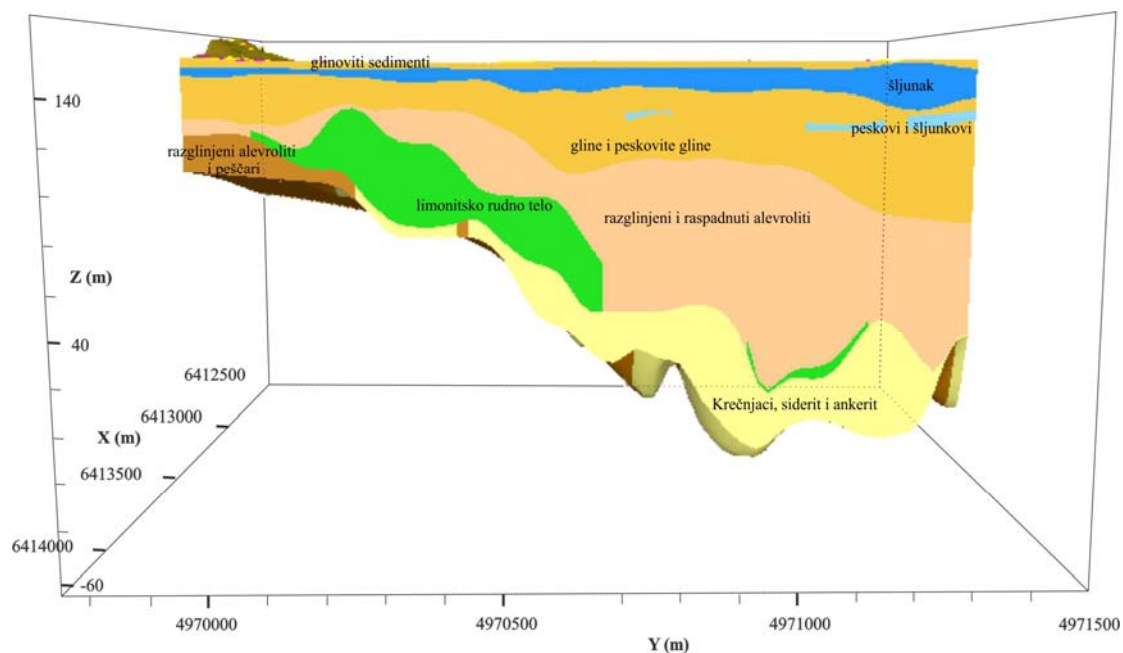
Na osnovu podataka o režimu podzemnih voda koji su vezani za sedamdesete godine 20. veka, preciznije, za period od marta 1971. godine do decembra 1973. godine, urađen je i kalibrisan prvi trodimenzionalni hidrodinamički model režima izdani površinskog kopa „Buvač“ za pomenuti period (Polomčić, 2008; Polomčić et al. 2013). I pored kvalitetno izvedene kalibracije, modelom je simulirano stanje režima podzemnih voda s početka 70-ih godina prošlog veka, što svakako umanjuje stepen pouzdanosti izvedenog modela u aktuelnim uslovima, pa je ovaj model namenjen prevashodno generalnom razmatranju i analizi strujanja podzemnih voda na nivou celog istražnog područja. Daljim hidrogeološkim istraživanjima, vršenim u periodu od 2008. do 2012. godine, prikupljeni su noviji podaci o stanju režima izdani, pa je, shodno tome, inoviran prvi hidrodinamički model, koji predstavlja novi hidrodinamički model površinskog kopa „Buvač“. Taj model nije mogao da bude novelirana verzija prvog modela, jer je na istražnom terenu došlo do bitnih promena, uzev u obzir napredovanja rudarskih radova i procesa predodvodnjavanja površinskog kopa, zatim i izmeštanja površinskih tokova.

Treba napomenuti da se sve ovo značajno odrazilo na izmenu graničnih uslova inoviranog modela.

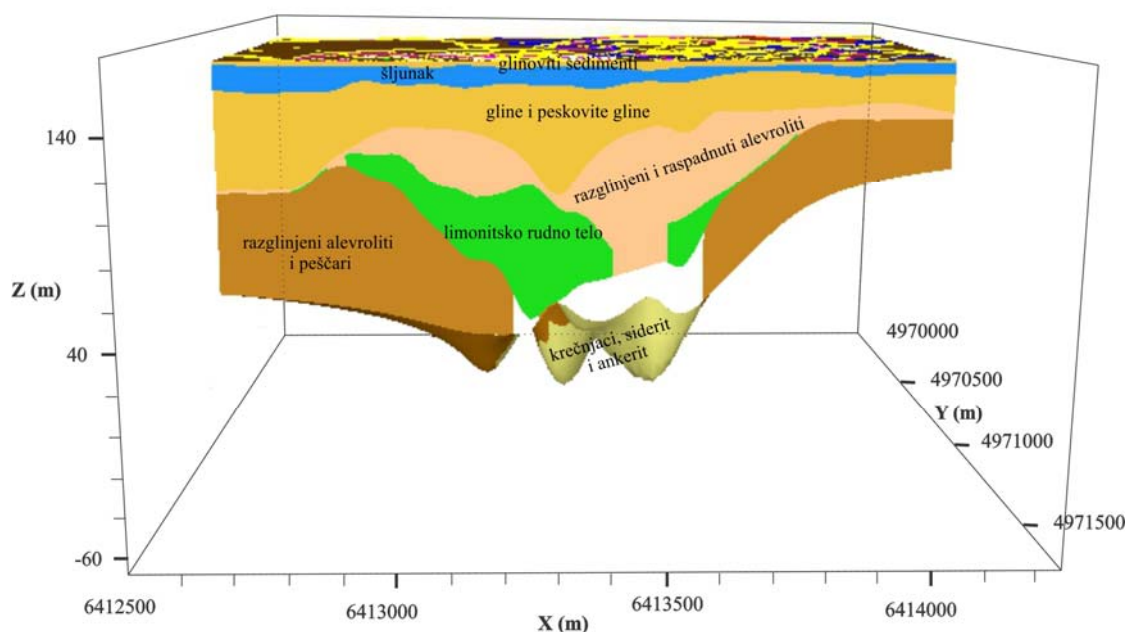
3.1. Diskretizacija strujnog polja istražnog područja

Hidrodinamički model površinskog kopa “Buvač” je konceptualno baziran na prethodno formiranom hidrogeološkom modelu i izrađen kao višeslojeviti model sa osam slojeva, posmatranih u vertikalnom profilu. Svi izdvojeni slojevi odgovaraju određenom „realnom sloju“, šematizovanom i izdvojenom na osnovu poznavanja terena i rezultata sprovedenih analiza od prikupljenih terenskih istražnih radova.

Kao ilustracija navedne šematizacije na slikama III-12 i III-13 su prikazani šematizovani litološki profili površinskog kopa “Buvač”, u pravcima jug-sever i zapad-istok.

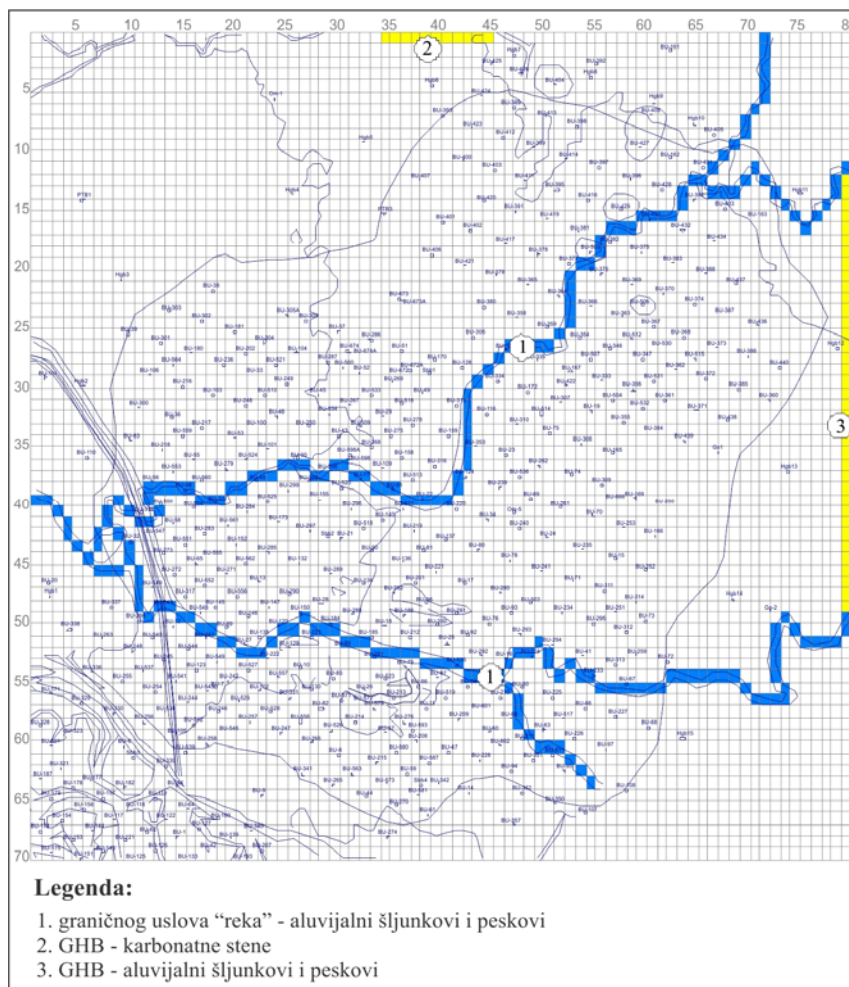


Slika III-12: Šematizovani litološki profil u pravcu jug - sever



Slika III-13: Šematizovani litološki profil u pravcu zapad - istok

Trodimenzijski hidrodinamički model istražnog područja, baziran na metodi konačnih priraštaja, izrađen je korišćenjem kóda ModFlow (Harbaugh et al., 2000) sa grafičkim korisničkim interfejsom Visual Modflow, verzija 4.2. Osnovne dimenzije matrice kojom je obuhvaćen izučavani teren su 2000 m x 1750 m, što čini 3.5 km². Diskretizacija strujnog polja u planu (slika III-14) izvedena je sa osnovnom veličinom ćelija 25 m x 25 m, koje, s obzirom na broj i kvalitet raspoloživih podloga, nisu dalje smanjivane. Vremenska diskretizacija izvedena je vremenskim korakom od jednog meseca, što se za razmatranu problematiku može smatrati zadovoljavajućim. Strujanje podzemnih voda je na modelu simulirano kao realno strujanje pod pritiskom ili kao realno strujanje sa slobodnim nivoom, a u svakoj ćeliji diskretizacije pojedinačno, pri čemu su uslovi strujanja tokom vremena menjani u skladu sa realnim uslovima.

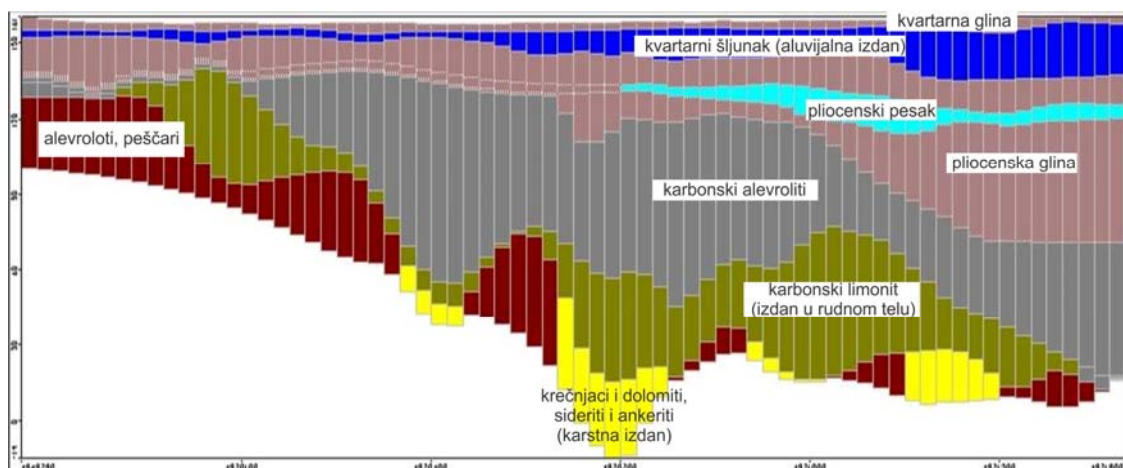


Slika III-14: Prikaz diskretizacije strujnog polja i položaja graničnih uslova u modelu na površinskom kopu "Buvač"

3.2. Geometrija šematizovanih slojeva istražnog područja

Realna geometrija šematizovanih slojeva je na modelu simulirana u skladu sa njihovim realnim rasprostranjenjem, kako u planu, tako i u profilu. Uzev u obzir prirodne uslove zaleganja geoloških članova, na modelu je zadato različito rasprostranjenje pojedinih slojeva u planu sa njihovim različitim, realnim debljinama. Geometrizacija slojeva, kao i njihovo prenošenje u koordinatni sistem modela, izvršeni su osnovu podataka brojnih istražnih bušotina (slika III-7), raspoređenih po celom istražnom području, kako je i prikazano kod izrade hidrogeološkog modela. Prema osnovnoj koncepciji modeliranja, a primenom metode konačnih priraštaja, matrice svih slojeva su istih dimenzija u planu, te

pokrivaju celu površinu šematizovanog područja. Na slici III-15 je na izabranom tipskom profilu prikazan rezultat ovakvog načina rada, odnosno, rezultat šematizacije koja je izvršena u vertikalnom profilu.



Slika III-15: Tipski profil hidrodinamičkog modela površinskog kopa „Buvač“ (jug - sever)

Na prikazanom profilu, doslednom tabeli III-2, može se konstatovati rasprostranjenje svih osam slojeva, pri čemu je karakteristično rasprostranjenje četvrtog sloja. U okviru ovog sloja se nalazi sloj šljunka i peska, koji je registrovan na severnom i istočnom delu istražnog područja, dok se prema jugu i zapadu ovaj sloj isklinjava. Na modelu ovaj sloj i dalje egzistira, pri čemu bočno prelazi u povlatne i podinske sedimente, izgrađene od glina i peskovitih glina. Ovim putem peskovito-šljunkoviti sloj na modelu odgovara realnim uslovima rasprostranjenja sloja u vidu sočiva. Slično navednom, na modelu u centralnom delu, u sloju sedam, nalazi se limonitsko rudno telo, oko koga se nalaze razglinjeni alevroliti, alevroliti i peščari. Takođe, sloj osam na modelu, koji predstavlja podinu rudnog tela, predstavljen je krečnjacima, sideritom i ankeritom u središnjem delu istražnog područja, koga okružuju razglinjeni alevroliti i peščari.

3.3. Filtracione karakteristike istražnog područja

Filtracione karakteristike u vidu hidrogeoloških parametara porozne sredine zadate su kao reprezentativne vrednosti u svakoj ćeliji diskretizacije. U tabeli III-3 može se videti

prikaz inicijalnih vrednosti hidrogeoloških parametara, koji su uneti u model za svaki sloj prikazanih u tabeli III-2.

Tabela III-3: Prikaz inicijalnih vrednosti hidrogeoloških parametara

Sloj	Koeficijent filtracije (duž x i y ose) (m/s)	Koeficijent filtracije (duž z ose) (m/s)	Specifično uskladištenje (1/m)	Efektivna poroznost (-)	Ukupna poroznost (-)
1	$8.50 \times 10^{-7} - 1.00 \times 10^{-6}$	1.00×10^{-6}	0.001	0.037	0.45
2	$1.40 \times 10^{-4} - 3.80 \times 10^{-4}$	1.00×10^{-4}	2.25×10^{-5}	0.225	0.3
3a	$6.20 \times 10^{-6} - 2.00 \times 10^{-5}$	1.00×10^{-6}	5.00×10^{-5}	0.06	0.3
3b	2.30×10^{-4}	-	6.00×10^{-5}	0.06	0.27
4a	5.00×10^{-6}	1.00×10^{-6}	5.00×10^{-5}	0.06	0.3
4b	$1.00 \times 10^{-4} - 1.40 \times 10^{-4}$	1.00×10^{-4}	2.25×10^{-5}	0.23	0.35
4c	2.3×10^{-4}	1.00×10^{-4}	6.00×10^{-5}	0.06	0.27
5a	4.0×10^{-6}	1.00×10^{-6}	5.00×10^{-5}	0.06	0.3
5b	2.3×10^{-4}	1.00×10^{-4}	6.00×10^{-5}	0.06	0.27
6a	1.00×10^{-6}	1.00×10^{-6}	6.30×10^{-5}	0.06	0.25
6b	2.3×10^{-4}	1.00×10^{-4}	6.00×10^{-5}	0.06	0.27
7a	$5.0 \times 10^{-5} - 2.40 \times 10^{-4}$	1.00×10^{-6}	5.00×10^{-5}	0.06	0.3
7b	1.5×10^{-5}	1.00×10^{-6}	6.30×10^{-5}	0.06	0.25
7c	2.3×10^{-4}	1.00×10^{-4}	6.00×10^{-5}	0.06	0.27
8a	$3.52 \times 10^{-4} - 4.70 \times 10^{-4}$	2.50×10^{-4}	6.30×10^{-5}	0.06	0.35
8b	1.00×10^{-6}	1.00×10^{-6}	6.30×10^{-5}	0.06	0.25

3.4. Granični uslovi na istražnom području

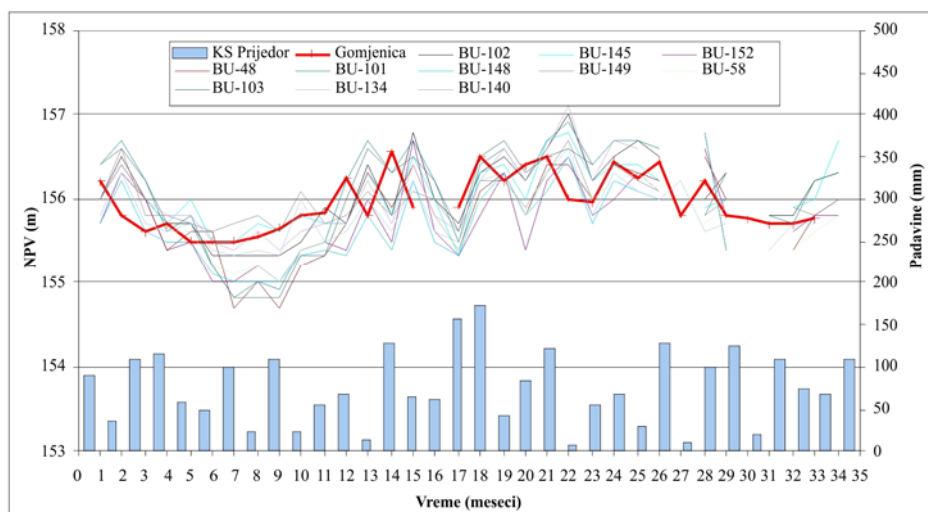
U hidrodinamičkom modelu površinskog kopa “Buvač” primenjena su dva opšta granična uslova, a pod njima spadaju sledeći granični uslovi koji su primenjeni u kódu Modflow (slika III-14):

- granični uslov gde je pijezometarski nivo zavisao od proticaja (Cauchy-ev ili mešoviti granični uslov):
 - granični uslov reka,
 - granični uslov opšteg pijezometarskog nivoa (GHB) i

- granični uslov zadatog proticaja (Neuman-ov granični uslov):
 - efektivna infiltracija.

Graničnim uslovom gde je nivo zavisan od proticaja simuliran je uticaj reke Bistrice i Gomjenice. U kódu ModFlow ove reke su simulirane graničnim uslovom „reka“, koje imaju bitnu hidrauličku ulogu u definisanju režima podzemnih voda istražnog područja. Za potrebe utvrđivanja uticaja površinskih tokova na režim podzemnih voda korišćeni su podaci monitoringa tokom više od dve i po godine, tačnije, od marta 1971. godine do decembra 1973. godine. Za pomenute analize korišćene su srednje mesečne vrednosti vodostaja Gomjenice. Podacima o vodostajima Bistrice nije se raspolagalo u obimu u kome su pribavljeni podaci za vodostaje Gomjenice, kao i podaci koji se tiču padavina. Navedeni podaci su iskorišćeni kao inicijalni u procesu kalibracije modela, a jedan od rezultata etaloniranja modela je i kvantifikovanje hidrauličkog uticaja Bistrice na režim podzemnih voda.

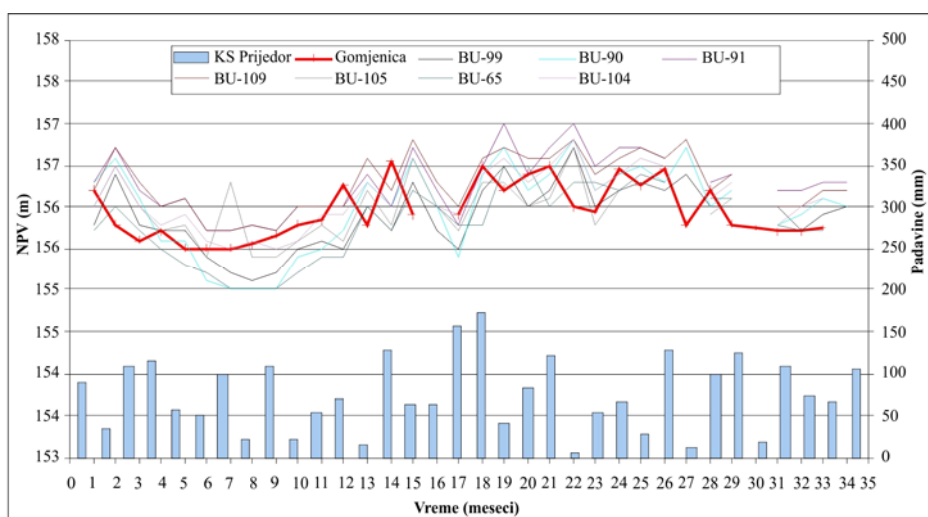
Na slici III-16 prikazane su uporedno oscilacije registrovanih vodostaja Gomjenice i nivoa podzemnih voda u aluvijalnoj izdani, kao i vrednosti mesečnih suma padavina registrovanih na kišomernoj stanici Prijedor, takođe, prikupljenih za isti period osmatranja koji je trajao dve i po godine.



Slika III-16: Uporedni prikaz oscilacija vodostaja Gomjenice, padavina i nivoa podzemnih voda aluvijalne izdani

Sa prikazanih dijagrama se vidi da postoji uticaj reke Gomjenice na režim podzemnih voda u aluvijalnoj izdani, kao i da je on fazno pomeren, odnosno, kako kasni za oscilacijama vodostaja reke i izraženo je tokom celog analiziranog perioda. S obzirom na veličinu kašnjenja nivoa podzemnih voda za oscilacijama vodostaja reke Gomjenice, može se pretpostaviti da je korito reke, na delu gde je usečeno u šljunkove, u manjoj meri kolmirano. S druge strane, podzemne vode aluvijalne izdani „brže“ reaguju na promene izazvane veličinom padavina.

Na slici III-17 dat je prikaz oscilacija vodostaja Gomjenice i registrovanih nivoa u podzemnih voda u limonitskom rudnom telu. Sa slike III-17 se može primetiti da i izdan formirana u limonitskom rudnom telu prati oscilacije reke Gomjenice, kao i da se „oseća“ uticaj padavina, te ovo nedvosmisleno ukazuje na hidraulički kontakt izdani sa aluvijalnim šljunkovima.



Slika III-17: Uporedni prikaz oscilacija vodostaja Gomjenice, padavina i nivoa podzemnih voda u limonitskom rudnom telu

Uzev u obzir kote dna reka, tj. činjenicu da su korita reka usečena u povlatne slojeve aluvijalne izdani, kao granični uslov su zadate u prvom i drugom sloju modela, te samim tim, i u aluvijalnim šljunkovima i peskovima. Smer kretanja vode između reke i izdani zavisi od hipsometrijskog odnosa nivoa podzemnih voda i nivoa u reci, pa ukoliko je nivo u reci viši od nivoa podzemnih voda, reka „hrani“ izdan, tj. smer toka

vode je iz reke u izdan. U suprotnom, reka drenira izdan, tj. smer kretanja vode je iz izdani u rečno korito.

Takođe, graničnim uslovom, u kom je nivo zavistan od proticaja, simuliran je uticaj karstifikovanih krečnjaka, smeštenih u podini rudnog tela. U kódu ModFlow njihov uticaj na modelu je zadavan preko granice opšteg pijeziometarskog nivoa - GHB. Postavljen je samo u osmom sloju u kome se nalaze karstifikovane stene, i to na severnom delu, odakle se i realno prihranjuje karstna izdan (slika III-5), s obzirom na opisane hidrogeološke karakteristike terena (poglavlje III-1.3).

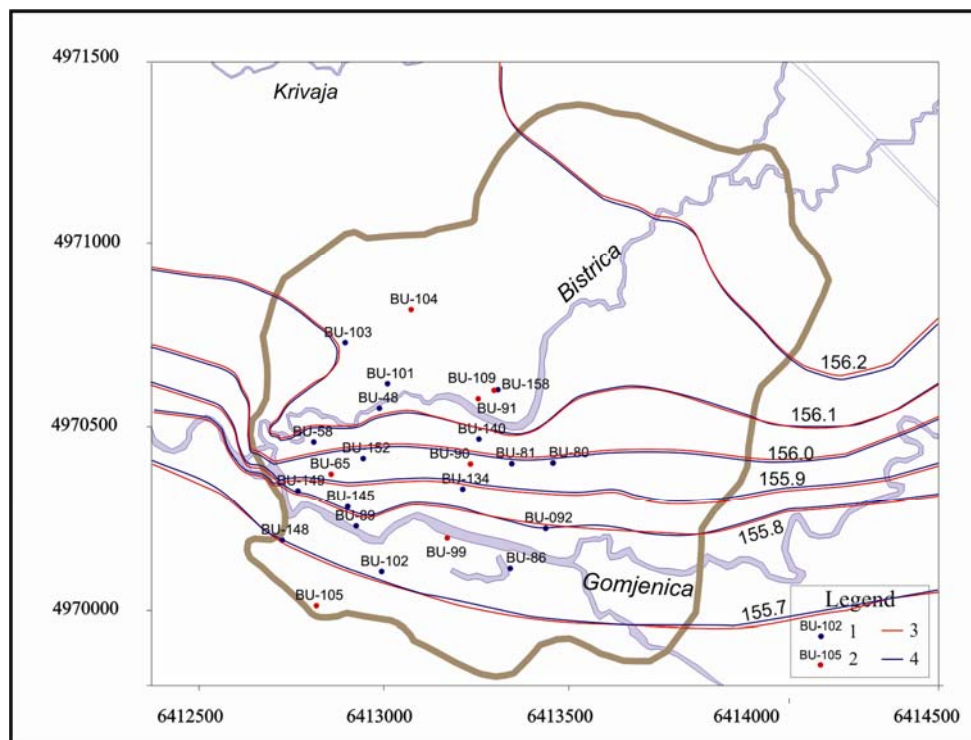
Graničnim uslovom zadatog proticaja simuliran je „vertikalni bilans”, pod kojim se ovde podrazumeva efektivna, resultantna infiltracija. Ovu veličinu čine: suma infiltracije od padavina, isparavanja sa nivoa podzemnih voda i evapotranspiracija. Na istražnom prostoru, u uslovima za koje su pribavljeni podaci, a u periodu od 1971. do 1973. godine, nivoi podzemnih voda nalaze se na malim dubinama od površine terena, te uticaj efektivne infiltracije na režim podzemnih voda ima značajnu ulogu. Prema zaključku istraživanja Instituta za geološka istraživanja (1973), navodi se da je prosečna infiltracija oko 5 l/s/km^2 , što iznosi 14.29 % sume padavina.

Za potrebe izrade hidrodinamičkog modela, prikupljene vrednosti padavina sa kišomerne stanice „Prijeđor” su zadate kao srednje mesečne padavine u modelu. Kao i granični uslov „reka“, uticaj padavina i isparavanja, izražen preko efektivne infiltracije, zadat je preko realnih mesečnih vrednosti, i to za ceo period simulacije režima podzemnih voda.

3.5. Etaloniranje prvog modela površinskog kopa „Buvač“

Etaloniranje modela je sprovedeno u nestacionarnim uslovima strujanja, vremenskim korakom u trajanju od jednog meseca, a za analizirani vremenski period, koji je trajao od marta 1971. godine do decembra 1973. godine. U procesu etaloniranja za verifikaciju dobijenih rezultata korišćeni su u prvom redu registrovani nivoi u pijeziometrima, a kao ilustracija je na slici III-18 prikazan raspored pijeziometara na

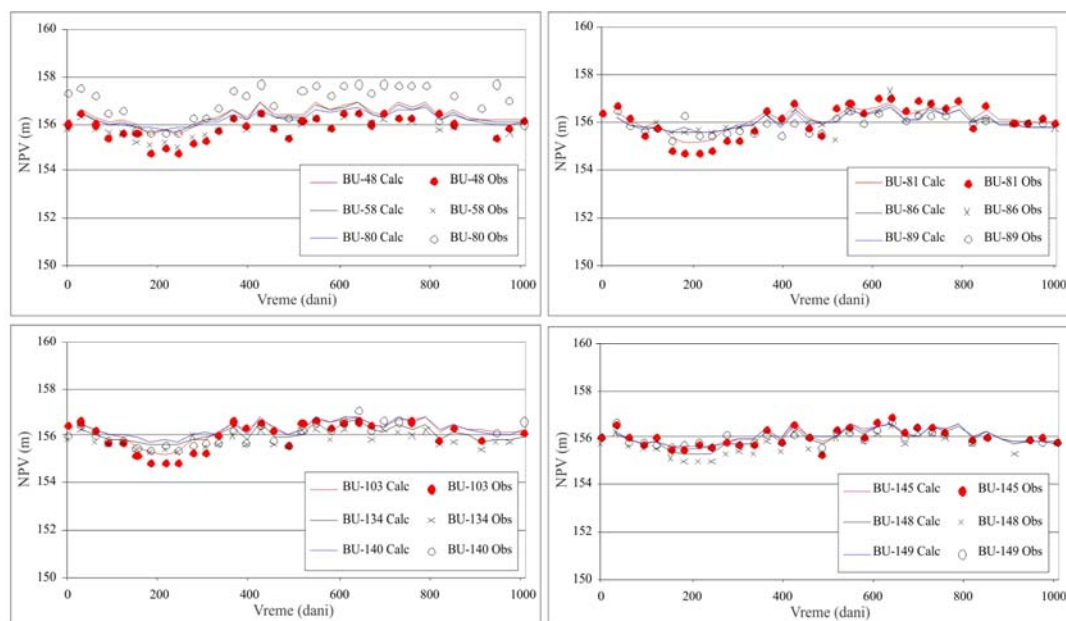
kojima su mereni nivoi podzemnih voda. Etaloniranje modela je bilo završeno kada je dobijena zadovoljavajuća saglasnost između registrovanih nivoa podzemnih voda i nivoa dobijenih proračunom. Na slici III-18 je prikazan raspored pijezometarskih nivoa u aluvijalnoj izdani, kao rezultat procesa kalibracije modela.



Slika III-18: Karta položaja osmatračkih objekata i rasporeda pijezometarskog nivoa u aluvijalnoj izdani na kraju perioda kalibracije modela (decembar 1973. god.)

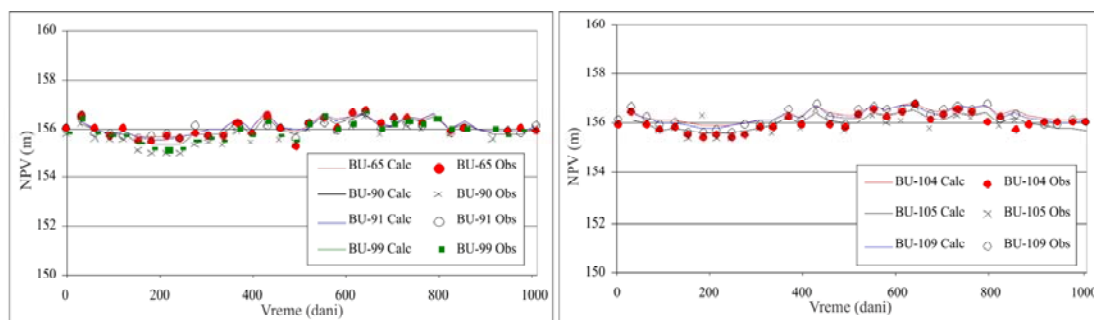
Legenda: 1) pijezometri u aluvijalnoj izdani, 2) pijezometri u izdani u rudnom telu, 3) izohipse dobijene na osnovu proračunatih podataka iz modela i 4) izohipse dobijene na osnovu merenih podataka na terenu

U cilju detaljnije analize na slici III-19 su prikazani osmatrani i registrovani nivoi podzemnih voda tokom perioda simulacije za veći deo objekata u aluvijalnoj izdani, a na slici III-20 za izdan u limonitskom rudnom telu.



Slika III-19: Nivogrami registrovanih i proračunatih nivoa podzemnih voda na izabranim objektima u aluvijalnoj izdani

Sa prikazanih dijagrama se može zaključiti da uopšteno postoji dobra usaglašenost rezultata matematičke simulacije režima podzemnih voda u odnosu na registrovane nivoe podzemnih voda na istražnom području.



Slika III-20: Nivogrami registrovanih i proračunatih nivoa podzemnih voda na izabranim objektima u izdani u okviru limonitskog rudnog tela

Na prikazanim nivogramima podzemnih voda u limonitskom rudnom telu uočljiva je dobra saglasnost proračunatih vrednosti sa registrovanim vrednostima nivoa voda.

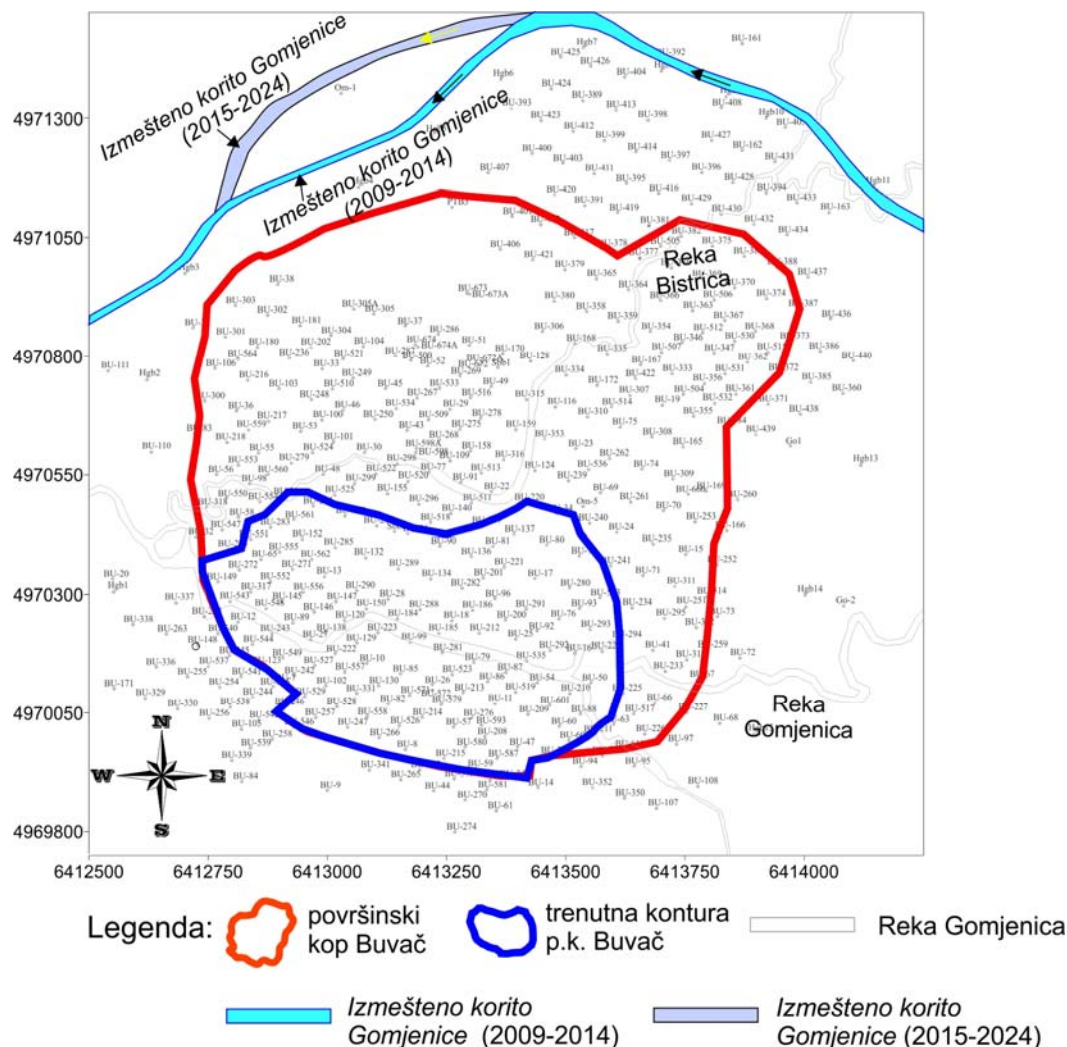
U analizi bilansa podzemnih voda na kraju vremenskog perioda za koji je obavljeno etaloniranje zaključeno je da se aluvijalna izdan prihranjuje na račun infiltracije rečnih voda Bistrice i Gomjenice, kao i na račun infiltracija padavina, a delom i podzemnim doticajem. Izdan u karstifikovanim krečnjacima se prihranjuje podzemnim doticajem iz pravca severa, a u limonitskom rudnom telu je formirana akumulacija podzemnih voda, koja se u prirodnim uslovima prihranjuje podzemnim doticajem iz izdani u karbonatnim stenama, a delom i iz aluvijalne izdani. Aluvijalna izdan se drenira delimično u rečna korita, a delimično i kroz jugozapadnu granicu modela, takođe, i procurivanjem u površinski kop „Mamuze“, dok se izdan u karbonatnim stenama drenira delom u limonitsko rudno telo. U tabeli III-4 dat je prikaz osnovnih elemenata bilansa podzemnih voda područja obuhvaćenog modelom u proračunskom periodu etaloniranja.

Tabela III-4: Elementi bilansa podzemnih voda na području rudnog ležišta „Buvač“

Granični uslov	Doticaj u model (l/s)	Oticaj iz modela (l/s)
Reka Gomjenica	8.32	10.52
Reka Bistrica	6.92	7.58
Podzemni doticaj sa severa (aluvijalne naslage)	2.26	-
Podzemni doticaj sa severa (karbonatne stene)	4.38	-
Podzemni doticaj sa istoka (aluvijalne naslage)	2.57	-
Podzemni doticaj sa juga (aluvijalne naslage)	3.22	-
Podzemni oticaj na zapadu (aluvijalne naslage)	-	8.48
Podzemni oticaj na jugu u p.k. „Mamuze“	-	4.81
Infiltracija od padavina	4.22	-
Suma	31.89	31.39

4. Inovirani trodimenzionalni hidrodinamički model površinskog kopa „Buvač”

Kako je već naglašeno, samo noveliranje prvobitnog hidrodinamičkog modela (Polomčić, 2008; Polomčić et al., 2013) nije bilo moguće, s obzirom na to da je bitno narušena strujna slika usled napredovanja rudarskih radova u odnosu na prvobitno stanje, i činjenice da je korito reke Gomjenice izmešteno u odnosu na stanje za koje je etaloniran prvi model (slika III-21). Na osnovu toga, prvobitni hidrodinamički model površinskog kopa „Buvač” je prilagođen aktuelnom stanju rudarskih radova, izmeštenom toku reke Gomjenice, pa je i dopunjen rezultatima novih geoloških i hidrogeoloških istraživanja, koja su vršena u periodu od 2008. do 2012. godine. Novija istraživanja podrazumevaju preciznije determinisanje prostornih odnosa litoloških članova i njihovih filtracionih karakteristika, a zone prihranjivanja i dreniranja zastupljenih izdani na području ležišta limonita „Buvač” su simulirane većim brojem graničnih uslova u odnosu na prvi model. U tom pogledu je i izvršena reambualcija postojećeg modela za nova osmotrena stanja režima podzemnih voda za period od oktobra 2010. godine do oktobra 2012. godine, za aktuelno stanje rudarskih radova u oktobru 2012. godine, a takođe, i za stanje izmeštenog toka reke Gomjenice. Softver Visual Modflow, verzija 4.2, kojim je urađen prvobitni model, zamenjen je programom Groundwater Vistas, verzija 6.31 (Rumbaugh & Rumbaugh, 2011). Takođe, za inovirani model, pored unosa homogeno raspoređenih koeficijenata filtracije, prostorni rasporedi koeficijenti filtracije uneti su u model i rezultat fazi kriginga, pa su ta dva slučaja odvojeno razmatrana. Svi navedeni detalji doprinose efikasnijem i pouzdanijem pristupu prilikom procesa modeliranja podzemnih voda, a samim tim je inovirani model (Polomčić & Bajić, 2015) podignut na viši nivo u odnosu na prvi model (Polomčić et al., 2013).

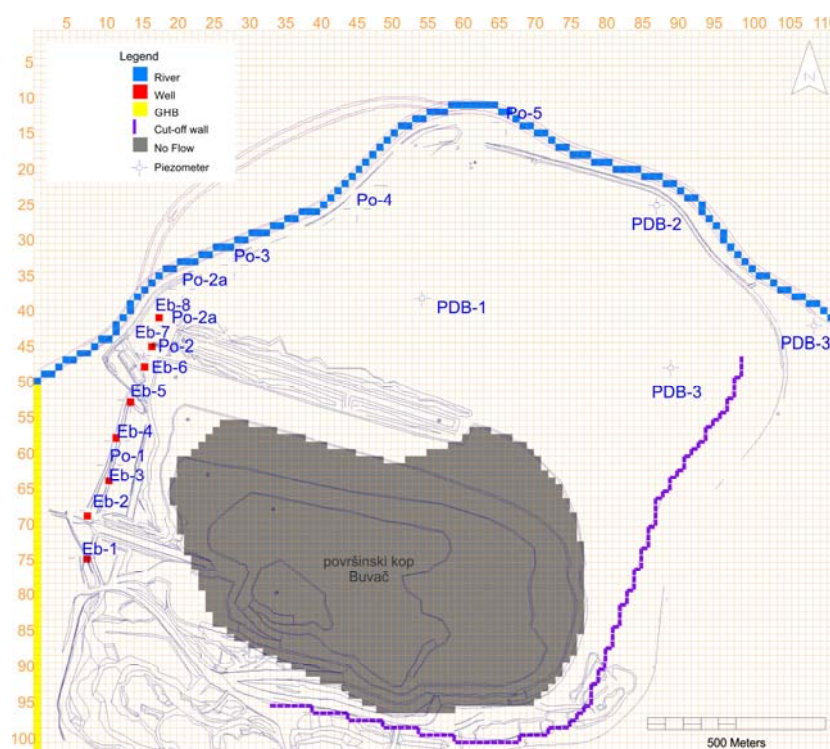


Slika III-21: Izmeštanje površinskih tokova sa područja površinskog kopa „Buvač”
(Polomčić & Bajić, 2015)

4.1. Postavljanje inoviranog hidrodinamičkog modela istražnog područja

Geometrijski odnosi zastupljenih litoloških članova i njihova šematizacija zadržani su kao kod prvobitnog hidrodinamičkog modela, tj. onako kako je predstavljeno kod hidrogeološkog modela površinskog kopa „Buvač“. Tako se model sastoji od osam slojeva u vertikalnom profilu, a usled dokazane hidraličke povezanosti prisutnih izdani na kopu, izraženo je prostorno trodimenzionalno strujanje podzemnih voda. Rezultat prenosa šematizovanih slojeva u model prikazan je prostornim rasporedom zastupljenih tipova izdani prikazanim na slikama III-8 – III-11. Novi trodimenzionalni

hidrodinamički model površinskog kopa „Buvač“, baziran na metodi konačnih priraštaja, izrađen je korišćenjem kóda Modflow (Harbaugh et al., 2000) sa grafičkim korisničkim interfejsom Groundwater Vistas (Rumbaugh and Rumbaugh, 2011). Osnovne dimenzije matrice modela su proširene u odnosu na prvobitni, pa novi model obuhvata teren od 2260 m x 2040 m, što čini površinu od 4.6 km² i dubinu od 175 m. Takođe, u odnosu na prvobitni model primenjena je detaljnija diskretizacija strujnog polja u planu mrežom od 102 reda i 113 kolona, odnosno, sa veličinom ćelija od 20 m x 20 m, homogeno po celom području obuhvaćenom modelom, a pritom nije smanjivana u pojedinim delovima, poštujući na taj način kvalitet i kvantitet podataka o području (Polomčić, 2004). Ukupan broj aktivnih ćelija je 85.425. Na slici III-22 prikazana je osnovna matrica inoviranog modela i diskretizacija strujnog polja na površinskom kopu “Buvač”.



Slika III-22: Prikaz diskretizacije strujnog polja i graničnih uslova na površinskom kopu “Buvač”. Legenda: River - granični uslov reka, Well - bunar, GHB - granica opšteg pijezometarskog nivoa; Cut-off wall - vodonepropusni ekran; No flow - strujna kontura (vodonepropusna granica); Piezometer - osmatrački objekat (piezometar)

4.2. Procena filtracionih karakteristika porozne sredine istražnog područja primenom fazi kriging metode

Filtracione karakteristike šematizovanih modelskih slojeva su zadate preko vrednosti koeficijenata filtracije i specifične izdašnosti izdani, čije su matrice sa zonama rasprostranjenja preuzete iz prvobitnog modela, ali su na osnovu rezultata novijih istraživanja izvršena u određenim zonama dodatna preciziranja. Vrednosti novijih parametara, koji su određeni prilikom testiranja bunara na površinskom kopu „Buvač”, prikazani su u tabeli III-5. Plavom bojom označeni su hidrogeološki objekti u aluvijalnoj izdani, dok su zelenom bojom označeni hidrogeološki objekti u izdani u rudnom telu.

Tabela III-5: Vrednosti koeficijenta filtracije i specifične izdašnosti izdani

Hg objekat	K_{sr} (m/s)	μ_{sr} (-)	Hg objekat	K_{sr} (m/s)	μ_{sr} (-)
Eb-1	9.9×10^{-5}	2.32×10^{-4}	BU-30	2.80×10^{-4}	-
Eb-2	2.16×10^{-4}	2.74×10^{-3}	BU-275	1.40×10^{-3}	-
Eb-3	6.48×10^{-5}	3.28×10^{-3}	BU-138	2.40×10^{-5}	-
Eb-4	1.34×10^{-4}	8.86×10^{-3}	BU-271	5.00×10^{-5}	-
Eb-5	4.77×10^{-4}	3.24×10^{-2}	PDB-9	5.00×10^{-4}	-
Eb-6	4.68×10^{-4}	2.07×10^{-2}	PDB-10	5.31×10^{-4}	-
Eb-7	2.30×10^{-4}	-	PDB-11	2.2×10^{-4}	-
Eb-8	5.60×10^{-5}	-	PDB-12	2.00×10^{-4}	-
PDB-1	1.21×10^{-4}	-	PDB-15	1.10×10^{-4}	-
PDB-2	4.95×10^{-5}	-	PDB-16	1.79×10^{-4}	-
PDB-3	4.00×10^{-5}	-	PDB-13	5.5×10^{-5}	-
PDB-4	5.37×10^{-5}	-	PDB-14	1.15×10^{-4}	-
BU-282	1.40×10^{-4}		PDB-17	1.30×10^{-4}	-
BU-291	1.20×10^{-5}		PDB-18	5.00×10^{-5}	-
BU-86	1.17×10^{-4}		PDB-19	1.19×10^{-4}	-
BU-N1	4.3×10^{-6}				

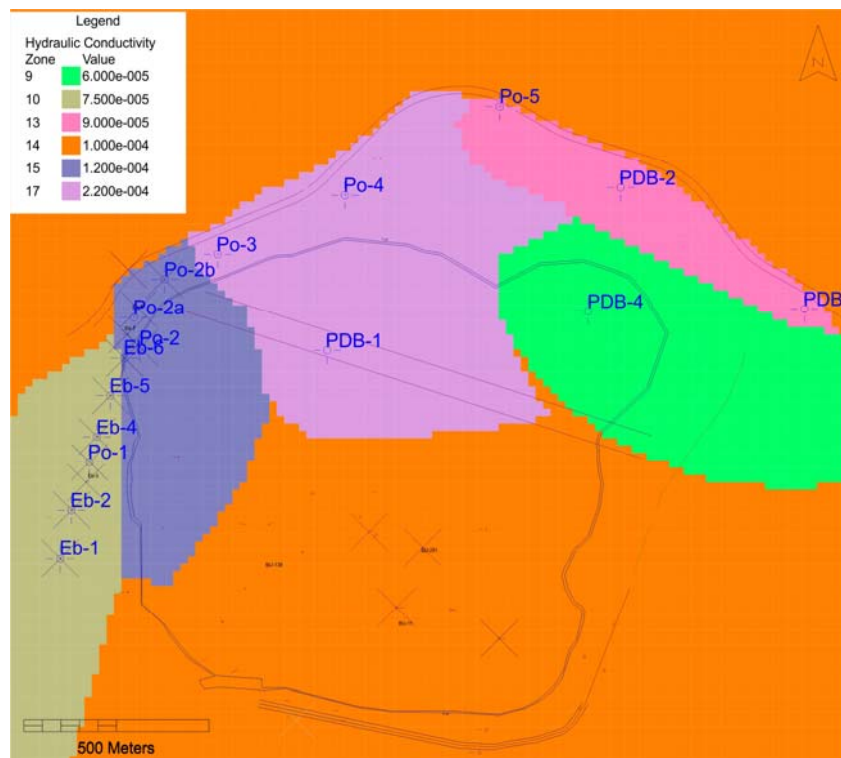
Koeficijent filtracije, kao jedan od bitnijih parametara hidrodinamičkog modela, tokom novijih istraživanja određen je na nevelikom broju bunara, kako je i prikazano u tabeli III-5, pa je stoga izvršena procena pomoću metode fazi kriginga, opisane u poglavlju II-3.6.

Procena koeficijenta filtracije započeta je njegovim unosom u softver „FUZZEKS“ (Bartels, 1996), i to u vidu klasične (numeričke) vrednosti (tabela III-5) i u vidu trougaonog fazi broja. Interval mogućih vrednosti ili tzv. skup podrške fazi broja definisan je na osnovu subjektivnih procena:

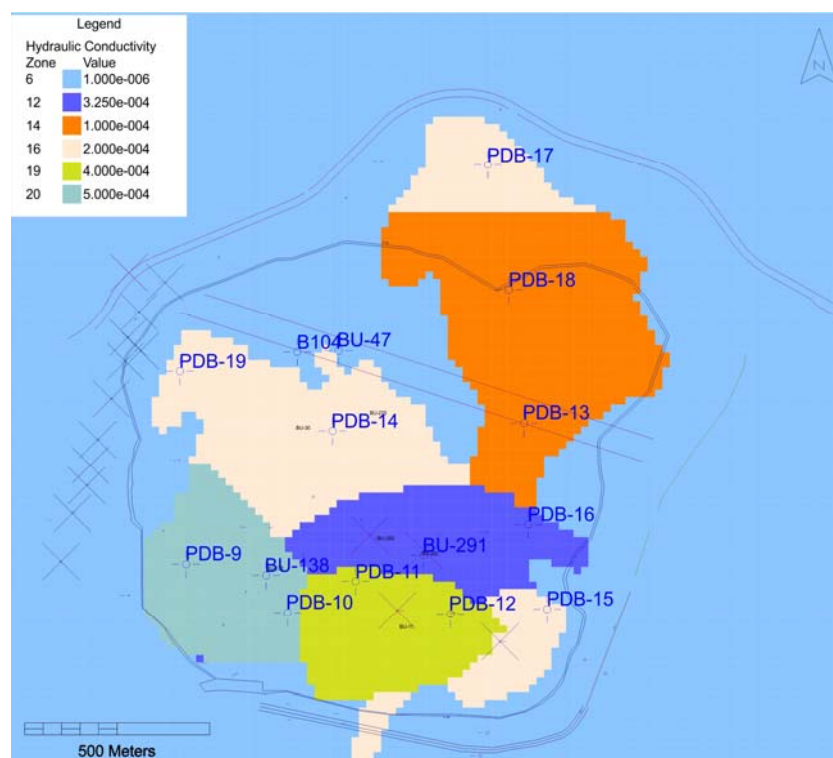
- za aluvijalnu izdan (2. sloj) od 4.95×10^{-5} do 4.77×10^{-4} m/s i
- za izdan u rudnom telu (7. sloj) od 1.1×10^{-6} do 5×10^{-4} m/s.

U softveru „FUZZEKS“ izvršena je transformacija ulaznih podataka u eksperimentalni variogram, a zatim je izrađen i teoretski variogram, na osnovu kog je i izvršena interpolacija vrednosti koeficijenta filtracije. Nakon toga, vršena je provera krigovanih vrednosti i izmena teoretskog variograma u slučaju „netipičnih vrednosti“ prema proceni eksperta, uz ponovnu interpolaciju koeficijenta filtracije. Izlaz iz programa predstavljaju vrednosti rasporeda koeficijenta filtracije koji su sačuvani u formatu „ascii“, te kao takvi bivaju pogodni za unos u softver za modeliranje podzemnih voda.

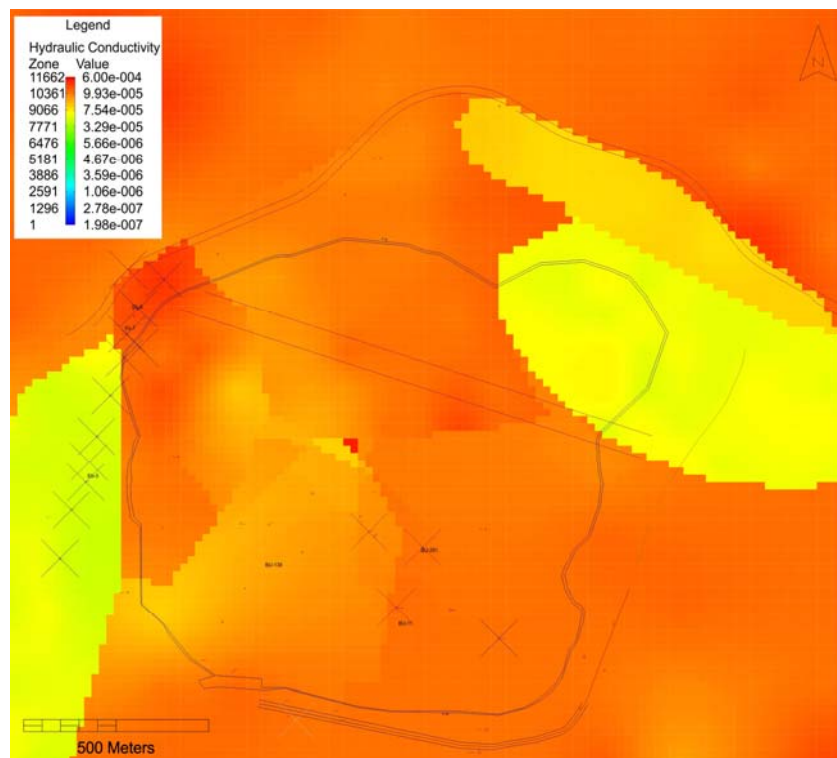
Shodno tome, koeficijenti filtracije su u hidrodinamički model uneti na dva načina: prvi način predstavljaju homogeno raspoređene zone koeficijenta filtracije oko hidrogeoloških objekata (slike III-23 i III-24), dok drugi način predstavljaju zone koeficijenta filtracije procenjenih metodom fazi kriginga (slike III-25 i III-26).



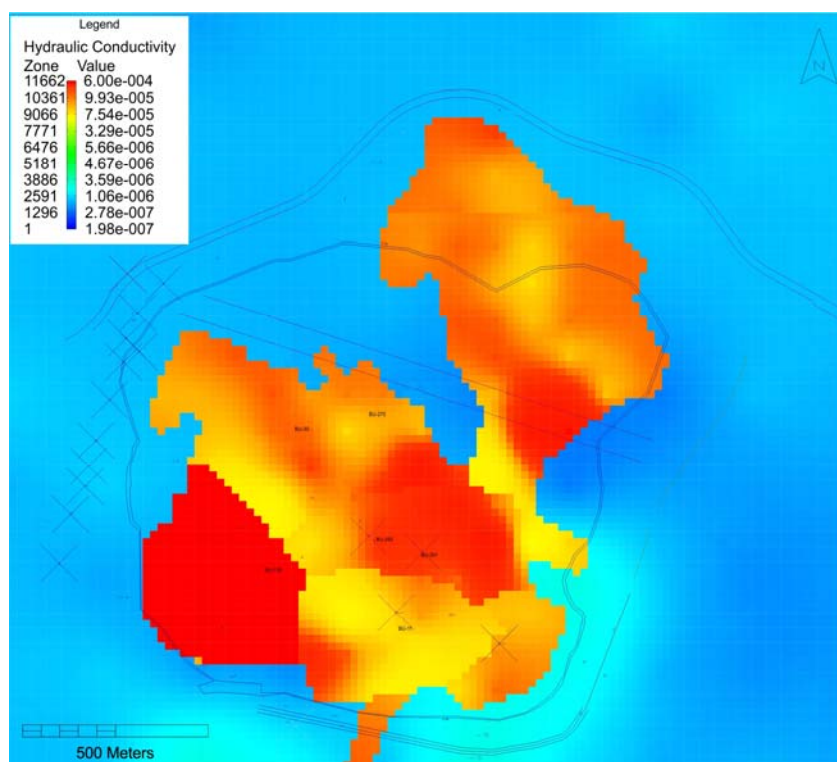
Slika III-23: Homogeno rasporedene zone koeficijenta filtracije (aluvijalna izdan)



Slika III-24: Homogeno rasporedene zone koeficijenta filtracije (izdan u rudnom telu)



Slika III-25: Zone koeficijenta filtracije procenjenih fazi krigingom (aluvijalna izdan)

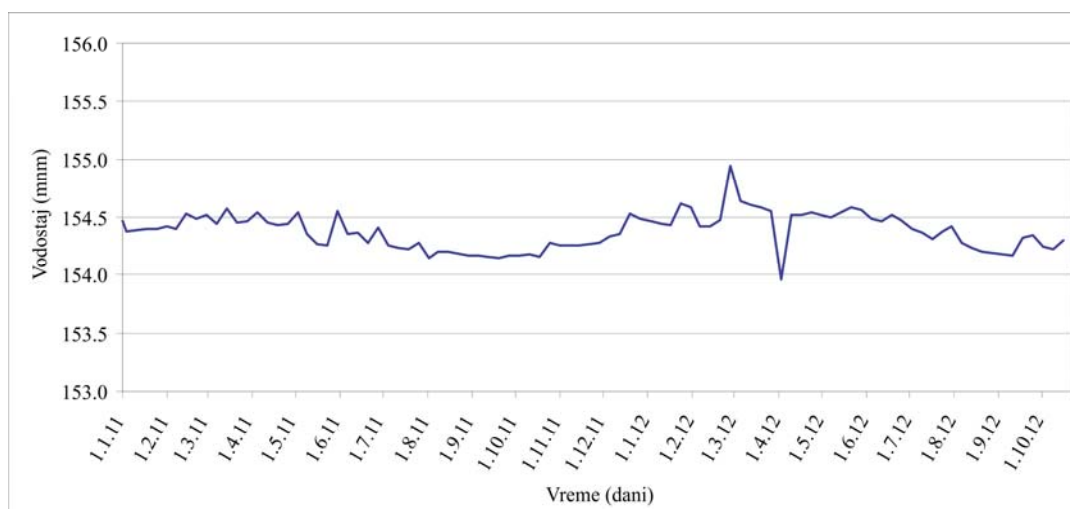


Slika III-26: Zone koeficijenta filtracije procenjenih fazi krigingom (izdan u rudnom telu)

4.3. Granični uslovi na istražnom području

U inoviranom hidrodinamičkom modelu površinskog kopa “Buvač”, pored graničnih uslova primenjenih u prvom modelu, korišćeni su i granični uslovi zadatog proticaja, a to su drenažni bunari i granični uslov barijera.

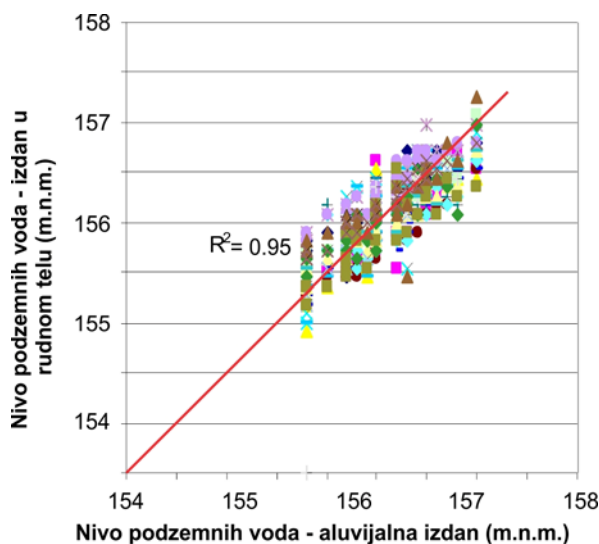
Graničnim uslovom u kom je nivo zavisao od proticaja simuliran je uticaj izmeštenog toka reke Gomjenica, a u kódu ModFlow ova simulacija je izvedena korišćenjem graničnog uslova reka. Navedeni površinski tok je zadat u prvom i drugom modelskom sloju (slika III-22) sa vrednostima vodostaja u periodu od 01.01.2011. do 15.10.2012. godine (slika III-27).



Slika III-27: Prikaz vodostaja Gomjenice na mernom profilu Most Kop - GMS u periodu 01.01.2011. - 15.10.2012. god.

Inicijalna debljina taloga na dnu rečenog korita je zadata vrednošću od 0.1 m, sa inicijalnom vrednosti koeficijenta filtracije rečnog taloga od 1×10^{-6} m/s. Vodeći se zaključcima iz prvog modela, utvrđena je hidraulička veza površinskih tokova sa izdanima u aluvijonu (slika III-16) i sa izdanima u rudnom telu (slika III-17). Ukoliko je nivo u reci viši od nivoa podzemnih voda, reka „hrani“ izdan, tj. smer toka vode kreće se iz reke u izdan. U suprotnom, reka drenira izdan, tj. smer kretanja vode je iz izdani u rečno korito. Takođe, hidraulička veza između izdani u aluvijonu i izdani u rudnom telu

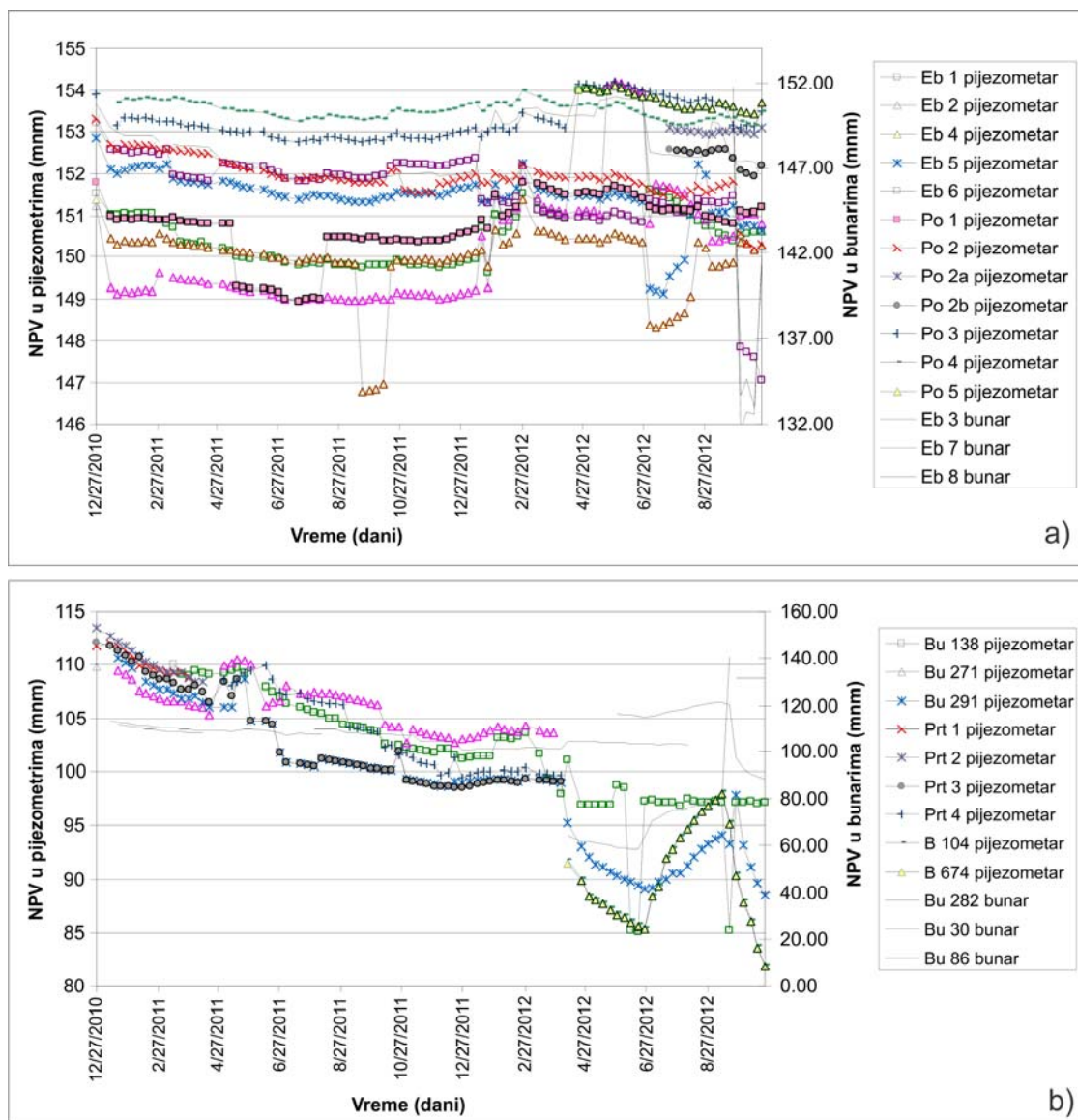
prikazana je na slici III-28. Koeficijent korelacije između nivoa podzemnih voda u aluvijalnoj izdani i nivoa podzemnih voda izdani u rudnom telu prikazuje vrlo čvrstu vezu ($R^2=0.95$).



Slika III-28: Korelaciona zavisnost između nivoa podzemnih voda u aluvijalnoj izdani i izdani u rudnom telu (2010-2012. god.) (Polomčić & Bajić, 2015)

Istim tipom graničnog uslova, tj. graničnim uslovom u kom je nivo zavisian od proticaja, simuliran je i podzemni doticaj, odnosno, oticaj u izdanima u okviru aluvijalnih naslaga, limonitskog rudnog tela i u podinskim krečnjacima. U kódu ModFlow doticaj i oticaj simulirani su „granicom opšteg pijeziometarskog nivoa - GHB”. U ove svrhe poslužili su registrovani nivoi podzemnih voda na osmatračkim objektima u aluvijalnoj izdani (slika III-29a), kao i u limonitskom rudnom telu (slika III-29b), a za period od 01.01.2011. do 15.10.2012. godine, dok su vrednosti ovog graničnog uslova za karbonatne tvorevine u podini limonita rezultat kalibracije modela. Konture pomenutog graničnog uslova na modelu prikazane su na slici III-22. Prema slojevima prikazanim na slici III-30, u karstnoj izdani (sloj 7) i izdani u pliocenskim peskovima (sloj 4) doticaj u model zadat je jedino na severnoj granici istražnog terena. Pliocenska izdan ima znatno veće rasprostranjenje severno od modelirane oblasti, a uticaj ove izdani u rubne delove pliocenskih peskova obuhvaćenih modelom zadat je preko graničnog uslova GHB, simulirajući doticaj, a uzev u obzir hipsometrisjke položaje zone hranjenja ove izdani na južnim padinama planine Kozara, koja je na severnom delu istražnog područja. Slično je

i sa karstnom izdani u osmom modelskom sloju, koja ima rasprostranjenje u centralnom delu modelirane oblasti, dok se na krajnjem severnom delu prostire van modelirane oblasti. Pretpostavka je, takođe, da ona predstavlja deo veće izdani koja se prostire prema zapadu, a detektovana je u površinskim kopovima zapadno od istražnog terena. Dodatni problem, usled neistraženosti terena, nalazi se u tome što ne postoje pijezometri u pliocenskoj i karstnoj izdani.



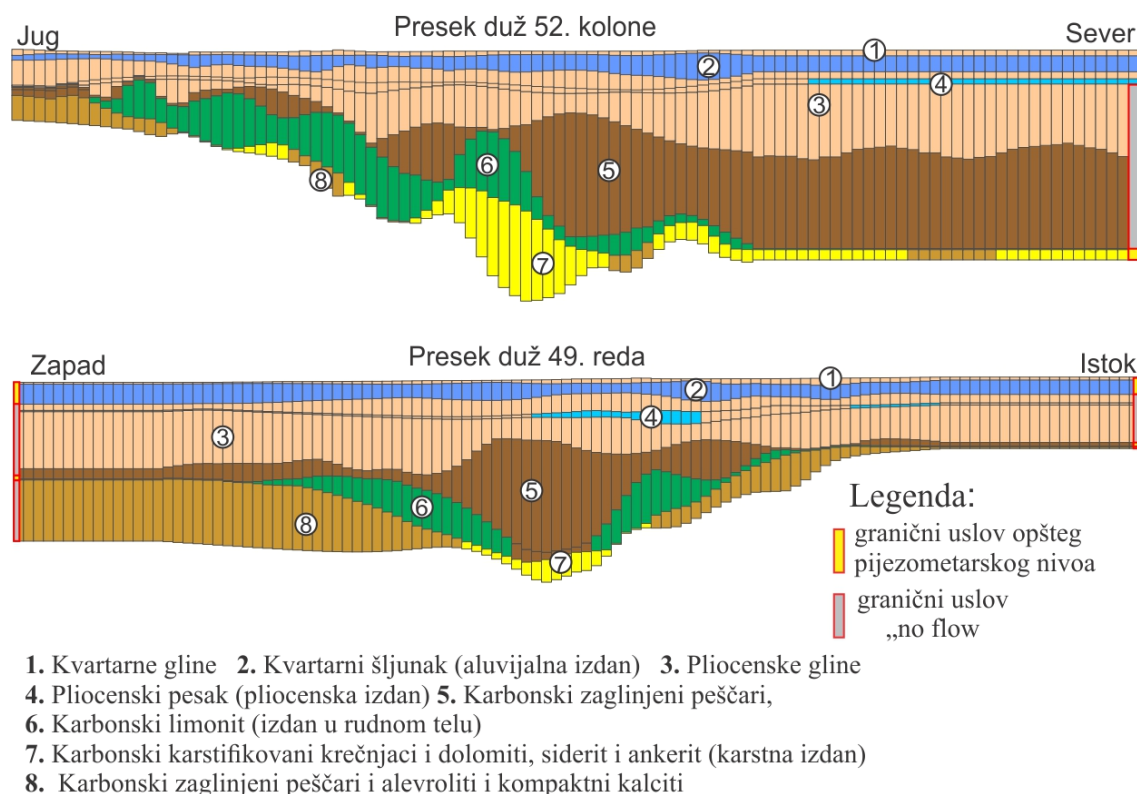
Slika III-29: Prikaz nivoa podzemnih voda a) aluvijalne izdani i b) izdani u rudnom telu u periodu januar 2011. - oktobar 2012. god.

Graničnim uslovom zadatog proticaja simuliran je rad drenažnih bunara i položaj strujne konture. Na površinskom kopu „Buvač“ u periodu 01.01.2011. do 15.10.2012. godine radilo je ukupno sedamanest drenažnih bunara. Valja napomenuti da dinamika rada ovih bunara nije ujednačena, kako zbog starenja bunara koji dreniraju aluvijalnu izdan, ispadanja istih iz funkcije, obaranja nivoa podzemnih voda u rudnom telu ispod kota dna filtarskih konstrukcija jednog dela bunara, a tako i uključenja novih bunara u rad. Na kraju perioda osmatranja, označenog 15.10.2012.godine, radilo je deset bunara (tabela III-6). Pojedinačni kapaciteti bunara su zadati prema podacima iz tabele III-6, a nalaze se u rasponu od 1-50 l/s, dok su za dane u kojima je kraći rad bunara procentualno umanjani njihovi proticaji. Lokacije bunara na području obuhvaćenom modelom su prikazane na slikama III-32 i III-33. Graničnim uslovom zadatog proticaja zadat je i slučaj kada nema proticaja ($q=0$), u kódu Modflow nazvanim „no-flow“ ćelije. Ovakve zone na površinskom kopu su predstavljene na mestima gde je trajno uklonjena jalovina, i to kao posledica rudarske aktivnosti (III-22). Krajnje konture „uslovno bezvodnih“ litoloških jedinica (modelski slojevi 3-8) predstavljene su graničnim uslovom „no-flow“ (slika III-30).

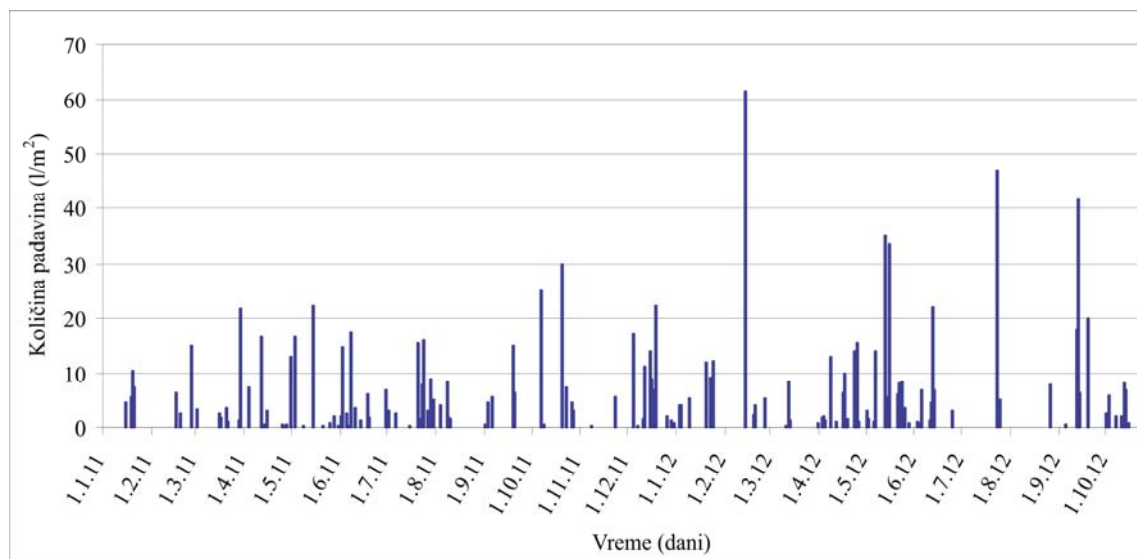
Tabela III-6: Vrednosti kapaciteta drenažnih bunara (l/s)

Bunar	Eb3	Eb6	Eb7	Eb8	Bu 11	Bu 138	Bu 291	Bu 282	Bu 275	Bu 30
Q (l/s)	1	3	10	8	20	8	11	7	50	25

Graničnim uslovom zadatog proticaja u prvom modelskom sloju simulirana je efektivna infiltracija. Prema zaključku iz prvog hidrodinamičkog modela navodi se da prosečna infiltracija predstavlja 14.29 % od sume padavina, što je i upotrebljeno za zadavanje ovog graničnog uslova sa podacima novijih merenja količina padavina u periodu od 01.01.2011. do 15.10.2012. godine (slika III-31).



Slika III-30: Presek terena duž slojeva modela: „jug-sever“ i „zapad-istok“ (Polomčić & Bajić, 2015)

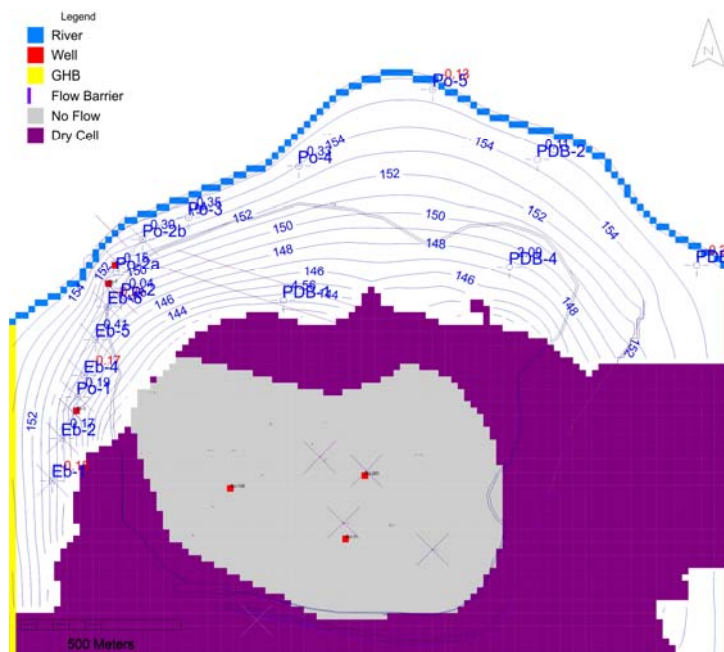


Slika III-31: Histogram srednjih mesečnih padavina (k.s. Prijedor) za period 01.01.2011. - 15.10.2012. god.

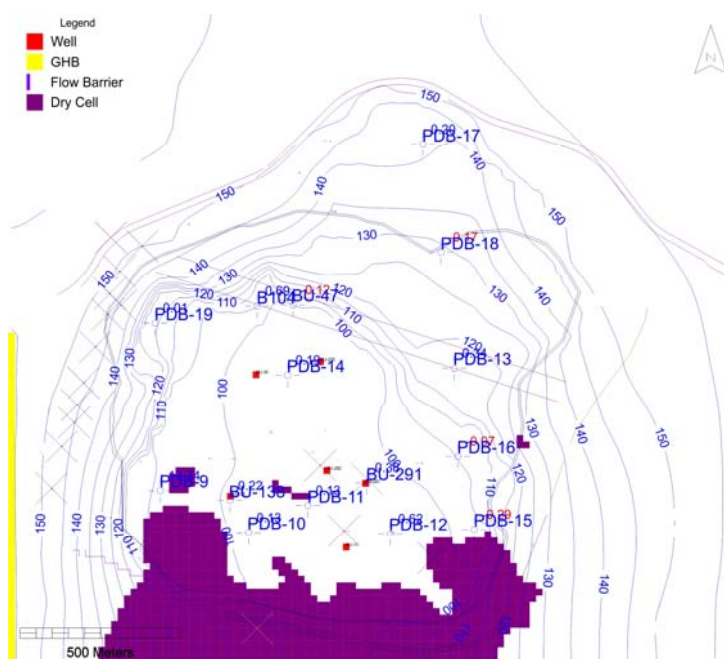
Graničnim uslovom zadatog proticaja simuliran je i vodonepropusni ekran. U kódu ModFlow je zadat preko graničnog uslova barijera. Lokacija ekrana (slika III-22), geometrijske karakteristike i karakteristike ispune simulirani su u prvom i drugom modelskom sloju, i to: prema planu rudarskih radova, vodonepropusni ekran sačinjen je od cementno-bentonitske ispune debljine 1 m, koeficijenta filtracije 1×10^{-8} m/s, a usečen je u ceo aluvijon do granice sa glinovitim sedimentima.

4.4. Kalibracija inoviranog hidrodinamičkog modela površinskog kopa „Buvač“

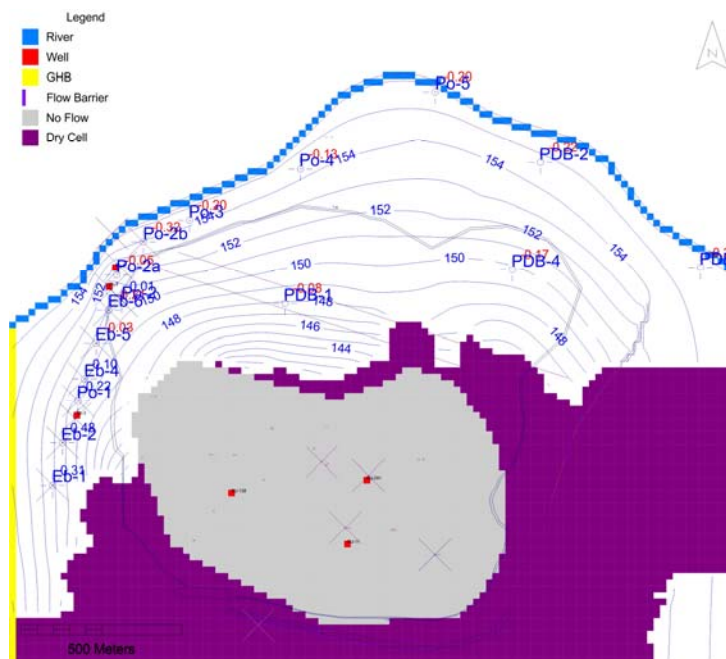
Kalibracija inoviranog modela je sprovedena u nestacionarnim uslovima strujanja, sa vremenskim korakom od jednog dana, što čini ukupno 654 koraka, a za vremenski period u kom su obezbeđeni svi relevantni podaci o izvorima prihranjivanja i dreniranja zastupljenih izdani, kao i podaci o registrovanim pijeziometarskim nivoima (period od 01.01.2011. do 15.12.2012. godine). Vremenski korak od jednog dana je na nižem nivou iteracija podeljen na deset delova nejednakog trajanja, a kalibracija modela bila je završena kada je dobijena zadovoljavajuća saglasnost između registrovanih nivoa podzemnih voda i nivoa dobijenih proračunom. Kao kontrolne tačke korišćeni su osmatrački objekti u aluvijalnoj izdani i u izdani u limonitskom rudnom telu (crveni brojevi na slikama III-32 – III-35). Na slikama III-32 – III-35 prikazani su rasporedi pijeziometarskih nivoa u aluvijalnoj izdani i izdani u rudnom telu za stanje režima podzemnih voda počev od 15.12.2012. godine, posebno u slučaju homogeno raspoređenih zona koeficijenata filtracije, kao i za zone rasporeda koeficijenata filtracije, procenjenih metodom fazi kriginga. Kao potvrda kvaliteta izvedene kalibracije modela na slikama III-36 i III-37 prikazan je dijagram merenih i proračunatih vrednosti nivoa podzemnih voda tokom kalibracije za oba slučaja rasporeda koeficijenata filtracije. Može se zaključiti da postoji bolja usaglašenost rezultata hidrodinamičke simulacije režima podzemnih voda u odnosu na registrovane nivoe podzemnih voda, u slučaju gde su za ulazne parametre koeficijenata filtracije uzete vrednosti procenjene metodom fazi kriginga. Dalje je u radu za određivanje bilansa podzemnih voda i prognozne hidrodinamičke proračune korišćen model u kom su ulazni podaci procenjeni metodom fazi kriginga.



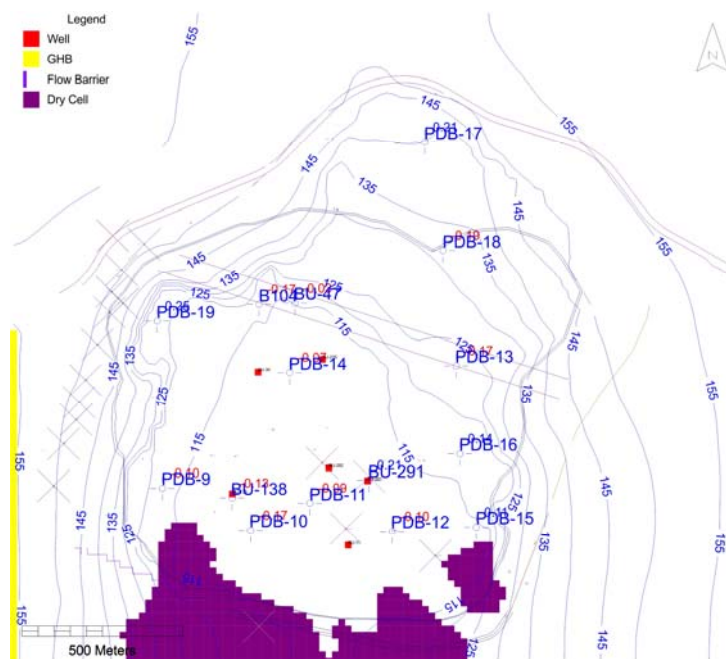
Slika III-32: Karta rasporeda pijezometarskog nivoa u aluvijalnoj izdani (15.10.2012. god.) za ulaz homogeno raspoređenih vrednosti koeficijena filtracije



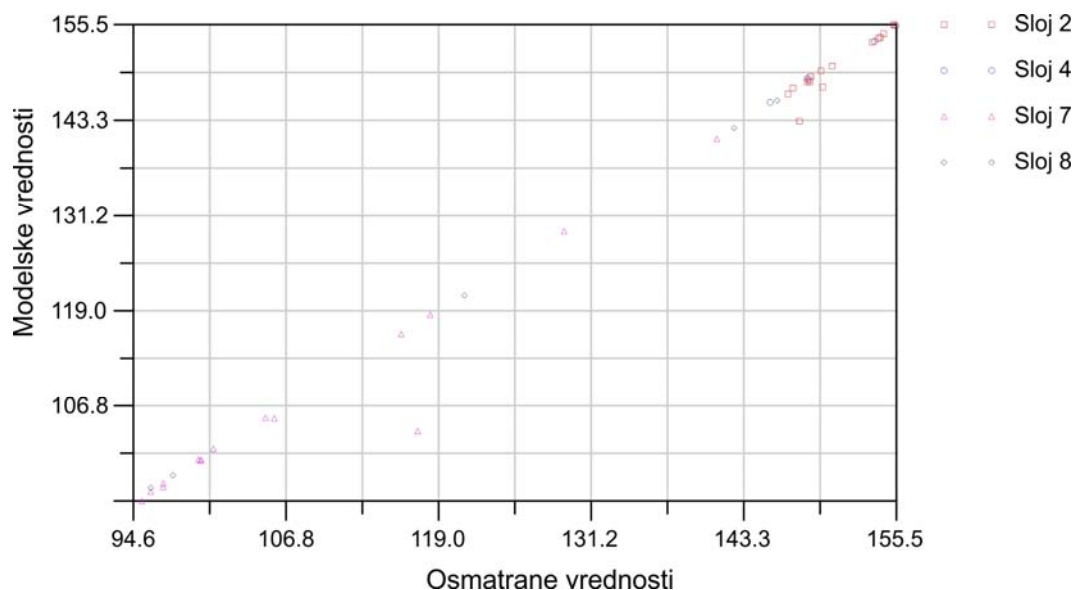
Slika III-33: Karta rasporeda pijezometarskog nivoa izdani u rudnom telu (15.10.2012. god.) za ulaz homogeno raspoređenih vrednosti koeficijena filtracije



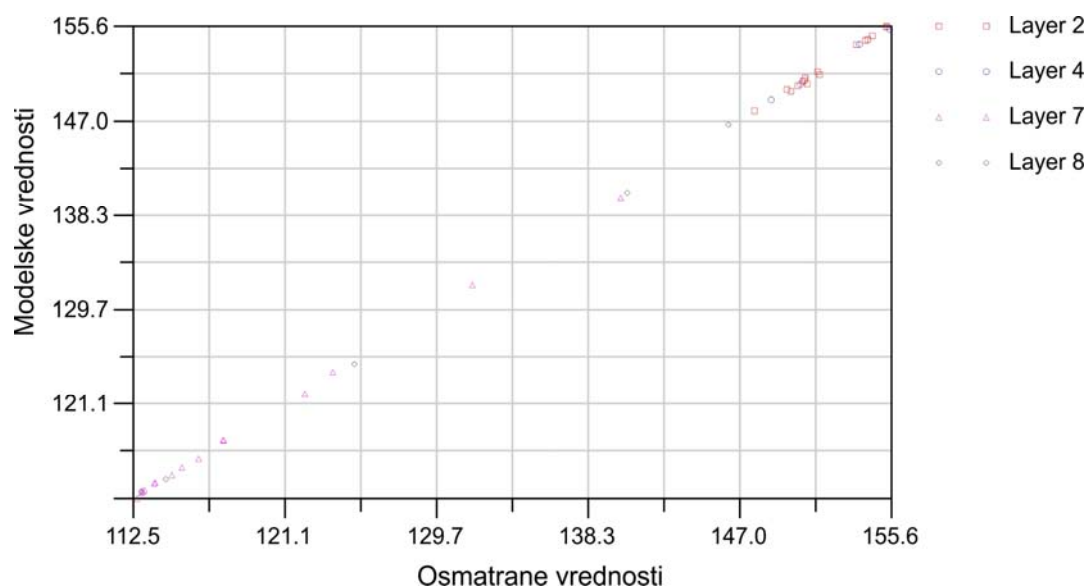
Slika III-34: Karta rasporeda pijezometarskog nivoa u aluvijalnoj izdani (15.10.2012. god.) za ulaz vrednosti koeficijenata filtracije procenjenih metodom fazi kriginga



Slika III-35: Karta rasporeda pijezometarskog nivoa izdani u rudnom telu (15.10.2012. god.) za ulaz vrednosti koeficijenata filtracije procenjenih metodom fazi kriginga



Slika III-36: Dijagram merenih i proračunatih vrednosti nivoa podzemnih voda tokom kalibracije za analizirani period (01.10.2010. – 15.10.2012. god.) za ulaz homogeno raspoređenih vrednosti koeficijenata filtracije



Slika III-37: Dijagram merenih i proračunatih vrednosti nivoa podzemnih voda tokom kalibracije za analizirani period (01.10.2010. – 15.10.2012. god.) za ulaz vrednosti koeficijenata filtracije procenjenih metodom fazi kriginga

4.5. Bilans podzemnih voda na istražnom području

U tabeli III-7 dat je prikaz osnovnih elemenata bilansa podzemnih voda područja obuhvaćenog modelom na kraju proračunskog perioda kalibracije (15.10.2012. godine.)

Tabela III-7: Bilans podzemnih voda hidrodinamičkog modela površinskog kopa “Buvač” (15.10.2012. god.) (Bajić et al., 2013)

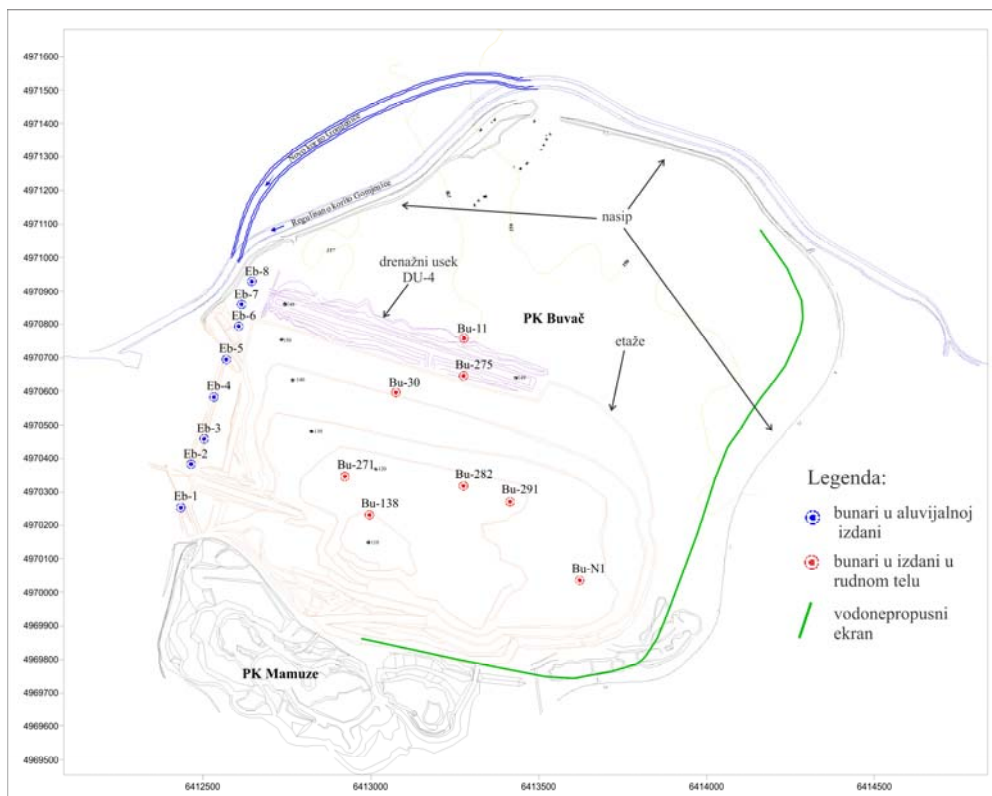
Izdan	Granični uslov	Doticaj u model (l/s)	Oticaj iz modela (l/s)
Aluvijalna izdan (sa izdani u pliocenskim peskovima)	Efektivna infiltracija	15	
	Reka Gomjenica	107	
	GHB istok		6
	GHB sever		4
	GHB zapad	11	
	Drenažni bunari		22
	Pretakanje u izdan u rudnom telu		51
Izdan u rudnom telu	GHB istok	37	
	GHB sever	29	6
	GHB zapad	24	
	Drenažni bunari		136
Karstna izdan	Pretakanje u izdan u rudnom telu		12
	GHB istok	5	
	GHB sever	8	
	GHB zapad	1	
Suma		237	237

Uzev u obzir analizu bilansa na kraju vremenskog perioda za koji je obavljena kalibracija, može se zaključiti da se u aluvijalnoj izdani dominantni vid prihranjivanja odvija na račun infiltracije površinskih voda reke Gomjenice. U odnosu na prvi model i na stanje režima za koji je taj model kalibrisan (1973. god.) primetno je višestruko uvećanje učešća površinskih tokova u prihranjivanju aluvijalne izdani, i to kao posledica rada drenažnih bunara na površinskom kopu, računajući pritom i bunare sa filterskim delom u rudnom telu, a takođe, primećeno je i intenziviranje infiltracije površinskih voda. Pored infiltracije padavina, određen je i podzemni doticaj od 1 l/s sa zapada, odnosno, oticaj na istok i na sever (sumarno 10 l/s). U rudnom telu kao posledica rada drenažnih bunara sa kapacitetom od 136 l/s, događa se preraspodela

proticaja između zastupljenih izdani na površinskom kopu „Buvač“, što potvrđuje pomenutu konstataciju o izraženom trodimenzionalnom strujanju podzemnih voda. U rudno telo na ovaj način dotiče 51 l/s iz aluvijalne izdani i 12 l/s iz podinske karstne izdani. Pored ovog doticaja, najveće količine vode dotiču iz pravca istoka, potom sa severa, a naposljetku i sa zapada. U karstnoj izdani naveden gubitak vode na račun infiltracije u izdan u rudnom telu se delimično nadoknađuje podzemnim doticajem sa severa, dok je doticaj sa istoka i zapada manje izražen.

5. Hidrodinamički prognozni proračuni za potrebe projektovanja sistema odbrane površinskog kopa “Buvač” od podzemnih voda

Prvobitna funkcija postojećih elemenata sistema (slika III-38) za odbranu od podzemnih voda na površinskom kopu „Buvač“ bila je u vezi sa predodvodnjavanjem. Postojeće elemente sistema 2012. godine činilo je osam bunara u aluvijalnoj izdani i osam bunara u izdani u rudnom telu, kao i vodonepropusni ekran na istočnoj deonici površinskog kopa. Planirana dubina površinskog kopa poklapa se sa dubinom zaleganja limonita, što iznosi oko 170 m. Nadalje, prikazani su hidrodinamički prognozni proračuni i varijante tehničkog rešenja sistema odbrane površinskog kopa “Buvač” od podzemnih voda iz aluvijalne izdani i izdani u rudnom telu.



Slika III-38: Prikaz elemenata sistema odbrane od podzemnih voda na površinskom kopu „Buvač“ na dan kalibracije hidrodinamičkog modela (2012. god.)

Posle uspešne kalibracije modela za stanje režima podzemnih voda od 15.12.2012. god. sledi njegova „eksploatacija“, koja podrazumeva hidrodinamičke proračune za potrebe projektovanja sistema odbrane od podzemnih voda površinskog kopa „Buvač“, kao i prikaz varijanti rešenja proračuna. Definisani elementi sistema odbrane od podzemnih voda, kao i dinamika njihovog formiranja i isključenja pojedinih elemenata, poslužili su kao dinamički orijentir pri razradi varijanti prognoze za period od 2013. do 2024. godine. Sve projektovane aktivnosti na odbrani površinskog kopa od podzemnih voda su bazirane na godišnjem nivou (01. januar), što se odnosi na aktiviranje i na prestanak rada pojedinih elemenata sistema odbrane od voda, ali i na stanje fronta povodom napredovanja rudarskih radova.

Hidrodinamički proračuni (Polomčić & Bajić, 2015) su sprovedeni u nestacionarnom režimu strujanja prema jedinstvenoj metodologiji u svim varijantama, uzevši kao osnovni proračunski vremenski interval od mesec dana, koji je na nižem nivou iteracija

podeljen na deset delova nejednakog trajanja. S obzirom na dinamičnost sistema, odnosno promenljivu konturu iskopa, kao i na različito vreme uključenja i isključenja pojedinih sistema odvodnjavanja površinskog kopa, proračuni su realizovani po odgovarajućim vremenskim intervalima. Stoga je rezultat proračuna na kraju jednog vremenskog interavala predstavljao i početni uslov za proračun u sledećem intervalu.

Najznačajnija promena strujne slike šireg područja kopa uslovljena je dinamikom izgradnje napredovanja konture iskopa, koja je data sa vremenskim korakom od godinu dana (slika III-39). Logično je i realno da projektovano napredovanje kopa ima linearan, neprekidan karakter, tako da izabrani vremenski preseki u stvari nisu istovremeno i reprezentativni, nego proizvoljno odabrani. Za razliku od njih, elementi drenažnog sistema se izgrađuju za relativno kratko vreme, a isto tako se i isključuju iz funkcije.

Kao primarni kriterijum odbrane od podzemnih voda zadato je da obaranje nivoa podzemnih voda u rudnom telu, a po svim varijantama i za svaku analiziranu godinu, mora biti 15 m ispod kote radne etaže, što je jedan od preduslova za nesmetane rudarske aktivnosti.

5.1. Menadžment scenariji - varijante rešenja karakteristika sistema odbrane od podzemnih voda

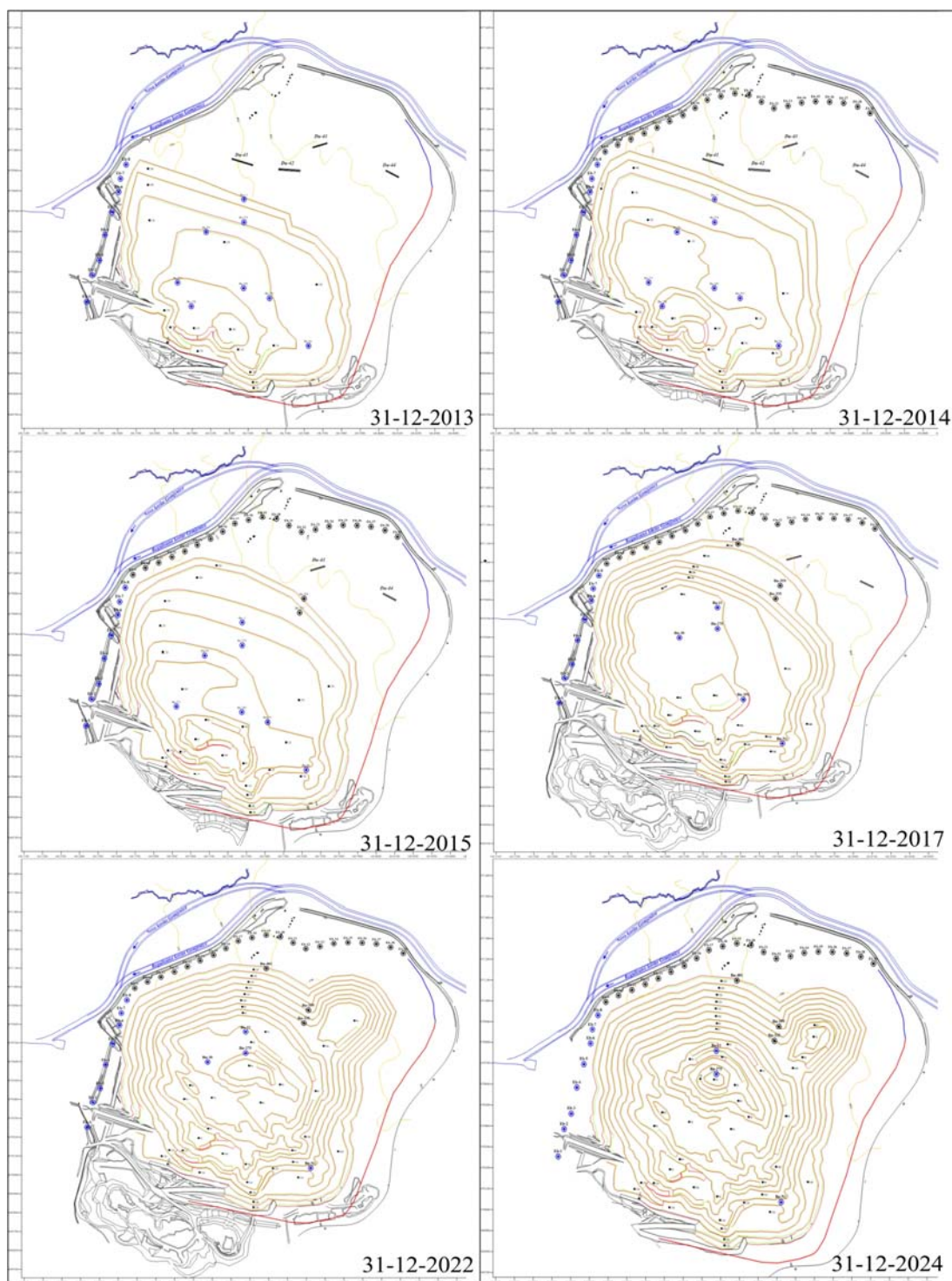
Za prognozni period, koji traje od 2013. do 2024. godine, definisane su tri varijante sistema odbrane od podzemnih voda, čije su razlike zasnovane na tehničkom rešenju, tj. na karakteristikama sistema odbrane od podzemnih voda, i to primarno iz aluvijalne izdani, a vidne razlike su: u vrsti, broju i dinamici rada elemenata sistema, dok su elementi sistema odbrane u rudnom telu isti za sve tri varijante. Početno stanje režima podzemnih voda i stanja rudarskih radova je 01.01.2013. god. Postojeći drenažni objekti koji predstavljaju početno stanje za analizu nisu zanemareni, već su u funkciji sistema dreniranja (slika III-38).

Period od januara 2013. do decembra 2014. godine je zajednički za sve razmatrane varijante, dok je 2015. godina zajednička za varijante 2 i 3. Od 2016. godine varijante se odvajaju od zajedničke osnove i samostalno se “razvijaju”, a u tabeli III-8 je prikazan

šematski “razvoj” varijanti prognoze odvodnjavanja površinskog kopa “Buvač”. Za sve razmatrane varijante je usvojeno i zadavano na modelu napredovanje kontura kopa prema projektovanim rudarskim aktivnostima do 2024. godine (slika III-39).

Tabela III-8: “Razvoj” varijanti prognoze odvodnjavanja p.k. “Buvač” (Polomčić & Bajić, 2015.)

Varijanta prognoze	2013		2014		2015		2016		2017		2022		2024
1													
2													
3													



Slika III-39: Prikaz napredovanja rudarskih radova na površinskom kopu „Buvač“ za određene vremenske preseke

Zajedničko za sve varijante zaštite kopa od podzemnih voda jesu:

- lokacije i početni kapaciteti postojećih drenažnih bunara (ukupno: 8) na zapadu koji dreniraju aluvijalnu izdan (Eb-1, ..., Eb-8),
- lokacija i karakteristike drenažnog useka DU-4 u aluvijalnoj izdani koji se aktivira 01.11.2013. godine,
- lokacija i vreme izmeštanja rečnog korita Gomjenice, koje se ponovo delimično izmešta 01.01.2015. godine u novo korito (slika III-21),
- lokacije, početni kapaciteti i dužina rada drenažnih bunara, koji primarno dreniraju rudno telo, a počinju sa radom od 01.1.2013. godine:
 - drenažni bunar BU-138 sa početnim kapacitetom od 8 l/s, koji radi do 31.12.2014. godine,
 - drenažni bunar BU-282 sa početnim kapacitetom od 7 l/s, koji radi do 31.12.2014. godine,
 - drenažni bunar BU-291 sa početnim kapacitetom od 11 l/s, koji radi do 31.12.2014. godine,
 - drenažni bunar BU-11 sa početnim kapacitetom od 20 l/s,
 - drenažni bunar BU-30 sa početnim kapacitetom od 25 l/s, koji radi do 31.12.2022. godine,
 - drenažni bunar BU-275 sa početnim kapacitetom od 50 l/s,
 - drenažni bunari BU-335 sa početnim kapacitetom od 25 l/s, koji drenira i rudno telo i karbonatne stene u podini rudnog tela, a koji počinje sa radom 01.01.2015. godine i radi do kraja eksploatacije i
 - drenažni bunar BU-401 sa početnim kapacitetom od 29 l/s, koji drenira i rudno telo i karbonatne stene u podini rudnog tela, a počinje sa radom 1.1.2016. godine i pritom radi do kraja eksploatacije.

Sistem drenažnih bunara u rudnom telu se sastoji od osam bunara sa pojedinačnim kapacitetima od 8-50 l/s. Drenažni usek DU-4 se kopa do podine aluvijalnih peskova i šljunkova na severnom delu ispred konture napredovanja kopa, imajući zadatak da prihvati podzemne vode koje nisu zahvaćene drenažnim objektima iz prve linije

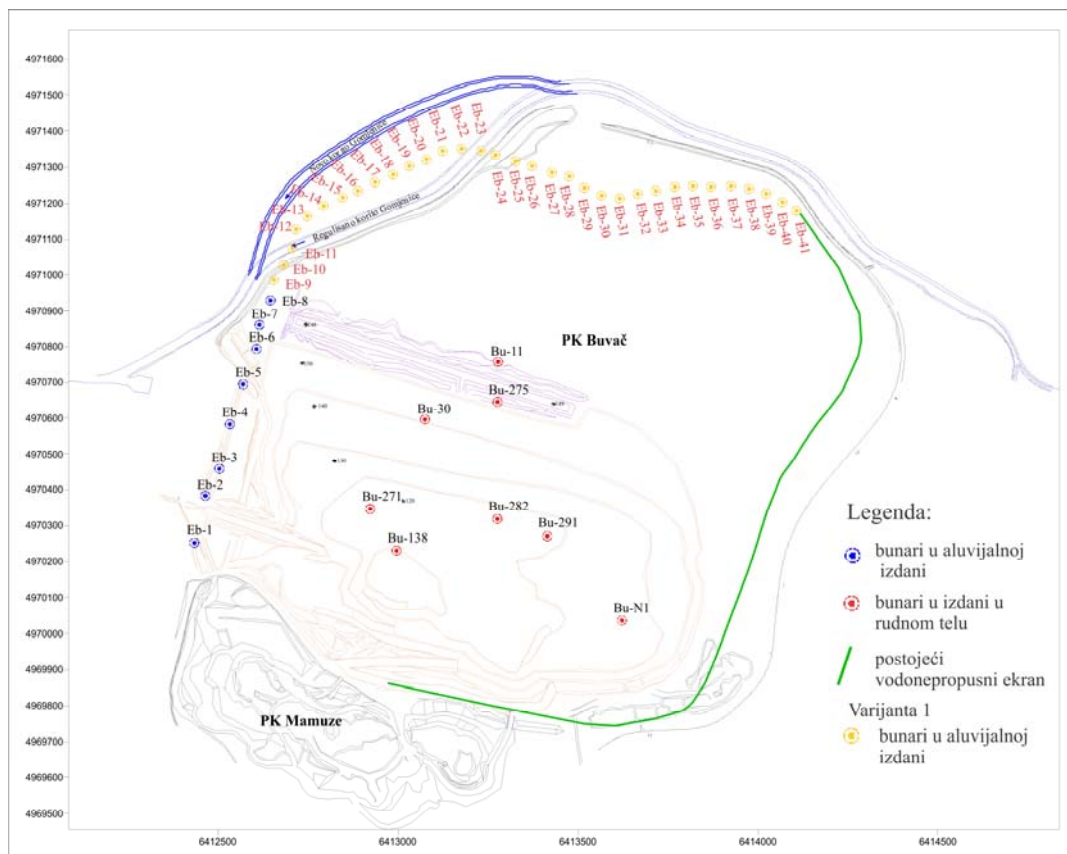
odbrane kopa. Voda iz drenažnog kanala se prebacuje do vodosabirnika i potom vraća u Gomjenicu.

5.1.1. Varijanta 1 sistema odbrane od podzemnih voda

U sistemu odbrane od podzemnih voda iz aluvijalne izdani, koje potiču uglavnom od infiltriranih voda reke Gomjenice, dodaju se nova 33 bunara (Eb-9, ... , Eb-41), pored 10 postojećih na severnom delu konture površinskog kopa, koji počinju sa radom 01.01.2015. godine. U tabeli III-9 dati su inicijalni kapaciteti ovih bunara, koji se kreću u granicama od 2 l/s do 7 l/s i kontinuirano rade tokom celog perioda eksploatacije, tj. sve do 2024 godine. Na slici III-40 dat je prikaz sistema odbrane od podzemnih voda po pomenutoj varijanti.

Tabela III-9: Inicijalni kapaciteti drenažnih bunara za varijantu 1

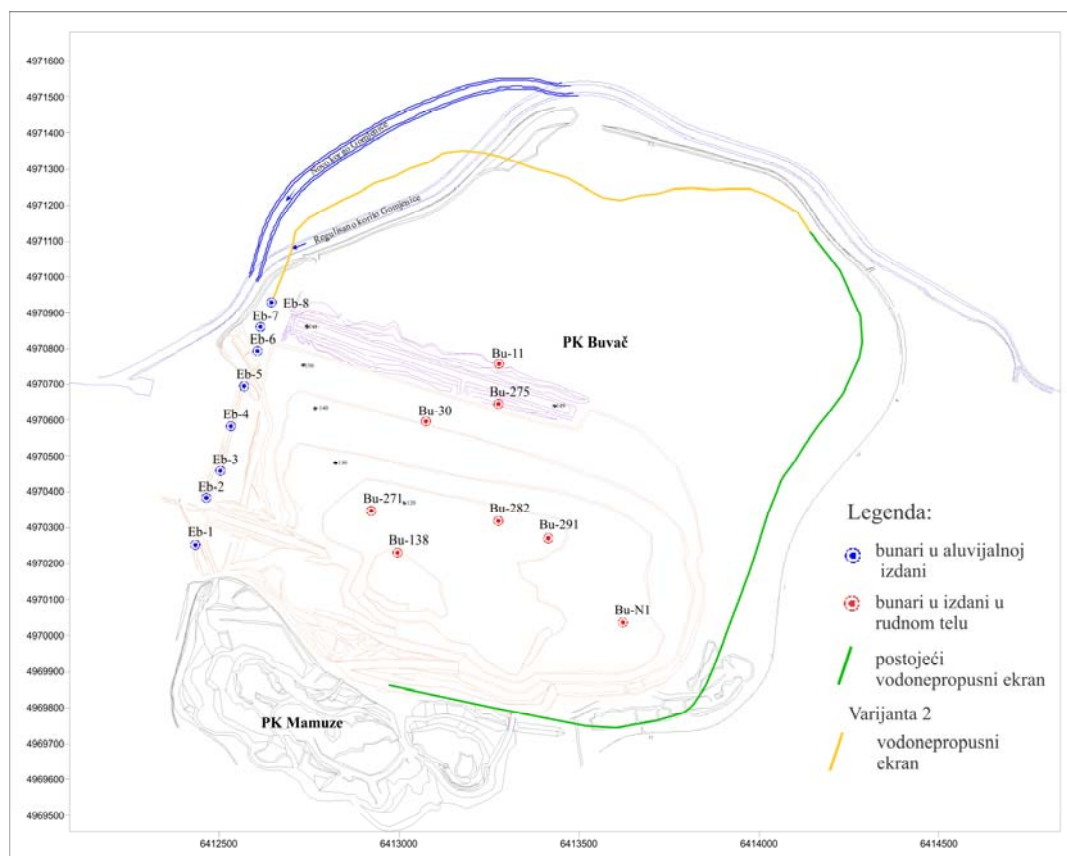
Bunar	Q (l/s)	Bunar	Q (l/s)	Bunar	Q (l/s)
Eb-9	4	Eb-20	3	Eb-31	7
Eb-10	4	Eb-21	3	Eb-32	5.5
Eb-11	4	Eb-22	3	Eb-33	5
Eb-12	4	Eb-23	4	Eb-34	5
Eb-13	4	Eb-24	4	Eb-35	5.5
Eb-14	4	Eb-25	4	Eb-36	7
Eb-15	4	Eb-26	4	Eb-37	5
Eb-16	4	Eb-27	3	Eb-38	4
Eb-17	3	Eb-28	3	Eb-39	3.5
Eb-18	3	Eb-29	6	Eb-40	3
Eb-19	3	Eb-30	7	Eb-41	2



Slika III-40: Odbrana severne granice površinskog kopa „Buvač“ od podzemnih voda aluvijalne izdani linijom drenažnih bunara (varijanta 1)

5.1.2 Varijanta 2 sistema odbrane od podzemnih voda

U sistemu odbrane od podzemnih voda iz aluvijalne izdani umesto 33 drenažna bunara, kao što je prikazano u varijanti 1, izrađuje se vodonepropusni ekran na istom mestu, dužine 1857 m i dubine do podine aluvijalnih naslaga, sa usecanjem 1 m u glinovito-prašinate naslage koji se ispunjava cementno-bentonitskom ispunom sa koeficijentom filtracije od $K = 10^{-8}$ m/s. Njegova uloga se ogleda u sprečavanju priliva podzemnih voda iz pravca reke Gomjenice. Vodonepropusni ekran je na modelu zadat počev od 01.01.2016. godine. Na slici III-41 dat je prikaz sistema odbrane od podzemnih voda po ovoj varijanti.



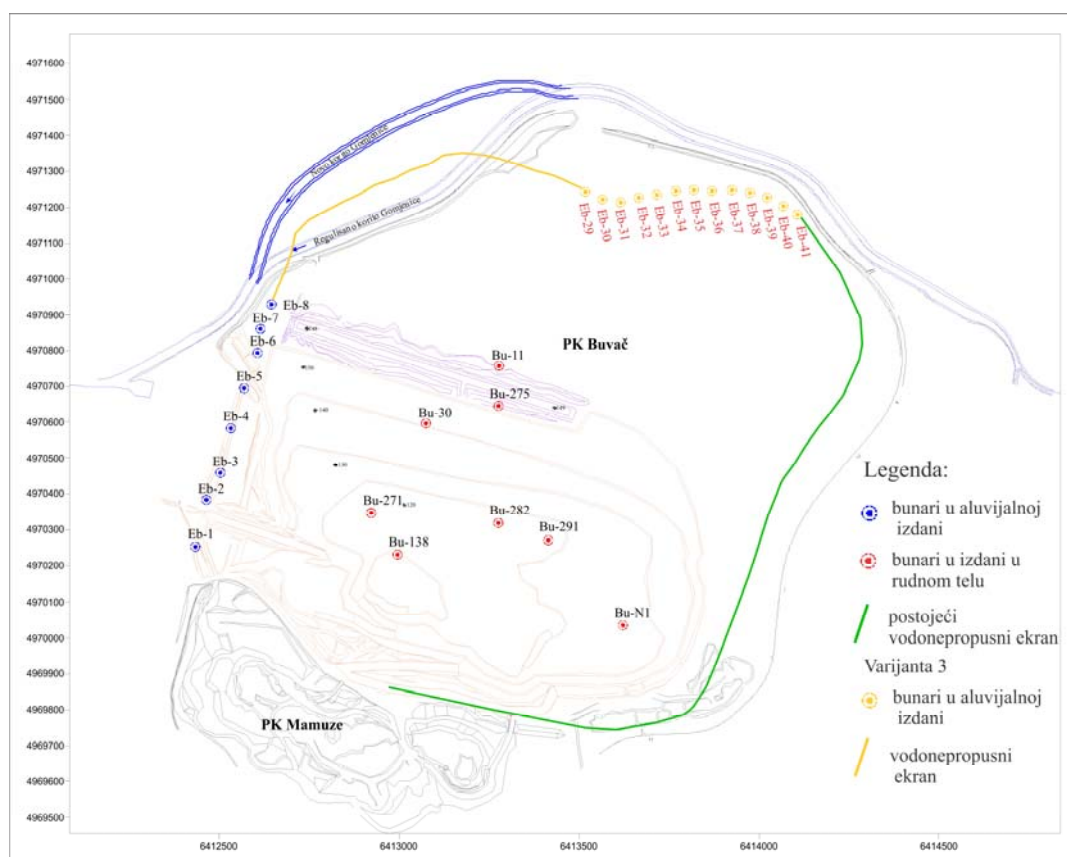
Slika III-41: Odbrana severne granice površinskog kopa „Buvač“ od podzemnih voda aluvijalne izdani vodonepropusnim ekranom (varijanta 2)

5.1.3. Varijanta 3 sistema odbrane od podzemnih voda

Prema varijanti 3 tehničko rešenje odbrane od podzemnih voda iz aluvijalne izdani predstavlja kombinaciju prethodne dve varijante: drenažnih bunara i vodonepropusnog ekrana. U severozapadnom delu kopa, gde je završna kontura kopa najbliža rečnom toku Gomjenice, a u nastavku bunara Eb-8, u dužini od 1143 m izrađuje se vodonepropusni ekran istih karakteristika kao i u varijanti 2, koji će biti izrađen do 01.01.2016. godine. U nastavku ekrana izrađuju se 13 drenažnih bunara (Eb-29, ... , Eb-41), istih karakteristika i početnih kapaciteta kao u varijanti 1 (tabela III-10), a počinju sa radom 01.01.2017. godine, radeći do kraja eksploatacije rude limonita, tj. do 2024. godine. Na slici III-42 dat je prikaz sistema odbrane od podzemnih voda po ovoj varijanti.

Tabela III-10: Inicijalni kapaciteti drenažnih bunara za varijantu 3

Oznaka	Q (l/s)	Oznaka	Q (l/s)
Eb-29	6	Eb-36	7
Eb-30	7	Eb-37	5
Eb-31	7	Eb-38	4
Eb-32	5.5	Eb-39	3.5
Eb-33	5	Eb-40	3
Eb-34	5	Eb-41	2
Eb-35	5.5		



Slika III-42: Odbrana severne granice površinskog kopa „Buvač“ od podzemnih voda aluvijalne izdani vodonepropusnim ekranom i drenažnim bunarima (varijanta 3)

5.2. Prikaz rezultata varijantnih hidrodinamičkih proračuna

Tokom vremena, a usled povećanja površine iskopa, rada drenažnog sistema, otkopavanja jalovine do površine rudnog tela i započinjanja njegove eksploatacije, dolazi do postepenog isušivanja vodonosne sredine, i to najpre u gornjim delovima terena, a kasnije i u nižim delovima terena. S obzirom na karakter veštački nametnutog režima podzemnih voda, isušena zona se postepeno, permanentno i nepovratno povećava. U modelu se posebno obeležavaju delovi strujnog polja koji su realno uklonjeni napredovanjem rudarskih radova (Polomčić & Bajić, 2015.), a to su tzv. “no flow” polja. Ovako obeležena polja u prostornoj mreži diskretizacije automatski se isključuju iz strujanja, te tako “no flow” zone dodatno menjaju oblast strujanja, pored već pomenute promenljive konture iskopa. Takođe, pored „no flow“ polja, koja su primarno posledica rudarskih aktivnosti, kao posledica obaranja nivoa javljaju se i suva polja (eng. „dry cell“), koja se takođe tokom vremena šire, zaviseći isključivo od rada drenažnog sistema.

Kod prikaza rezultata prognoznih proračuna odvodnjavanja površinskog kopa „Buvač” za karakteristične vremenske preseke usvojeno je sedam preseka i to za:

- kraj 2013. godine,
- kraj 2014. godine,
- kraj 2015. godine,
- kraj 2016. godine,
- kraj 2017. godine,
- kraj 2022. godine i
- kraj 2024. godine.

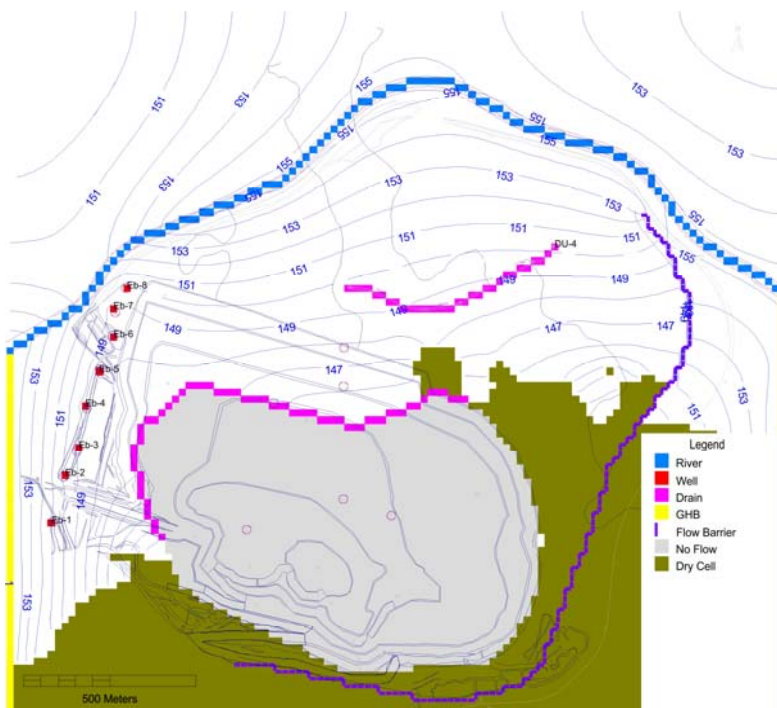
Pijezometarski nivoi u aluvijalnoj izdani, dobijeni proračunima za svaku varijantu, prikazani su u obliku karata hidroizohipsi sa ekvidistancom od 1 m (slike III-43 – III-58). Pijezometarski nivoi u rudnom telu, dobijeni proračunima, prikazani su u obliku karata hidroizohipsi sa ekvidistancom od 5 m (slike III-59 – III-65).

Kapaciteti drenažnih bunara prikazani su na nekoliko načina:

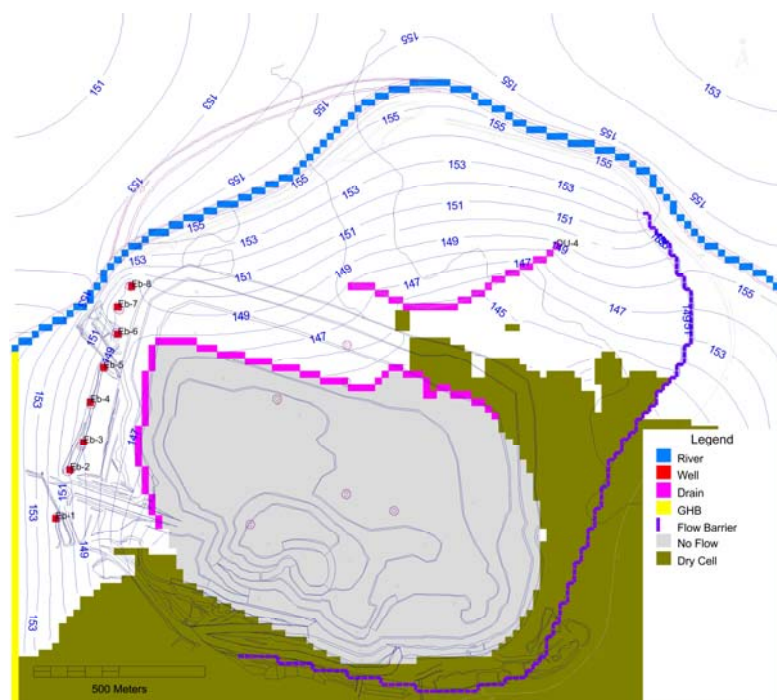
- grafičkim putem: u vidu hidrograma crpenja drenažnih bunara za ceo proračunski period za sve varijante, posebno za bunare u aluvijalnoj izdani (slike III-66 – III-68), a posebno za bunare u izdani u rudnom telu (slike III-70 – III-72)
- tabelarnim putem: kao početni (maksimalni), srednji i krajnji (minimalni) proticaji svakog pojedinačnog bunara unutar proračunskog perioda (1.2013. - 12.2024.god., a za svaku od varijanti zaštite kopa od podzemnih voda, ali i posebno za bunare u aluvijalnoj izdani (tabele III-11 – III-13) i za bunare u izdani u rudnom telu (tabele III-14 – III-16)
- grafičkim putem: kao uporedni prikaz ukupnih kapaciteta drenažnih bunara za svaku varijantu prognoze i za svaki mesec tokom analiziranog perioda, posebno za bunare u aluvijalnoj izdani (slika III-73), posebno za bunare u izdani u rudnom telu, (slika III-74).

Uporedni doticaj podzemnih voda u drenažni usek DU-4 prikazan je grafički za svaku varijantu (slika III-69).

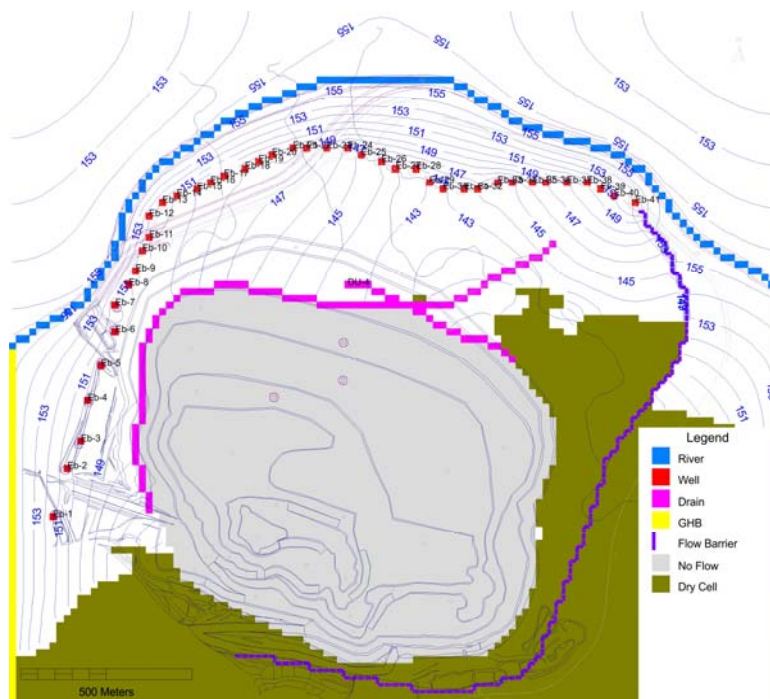
Doticaj podzemnih voda iz kosine etaže u površinski kop tokom analiziranog perioda (01.2013. - 12.2024. god.) prikazan je za svaku od varijanti odbrane kopa od podzemnih voda (slika III-75).



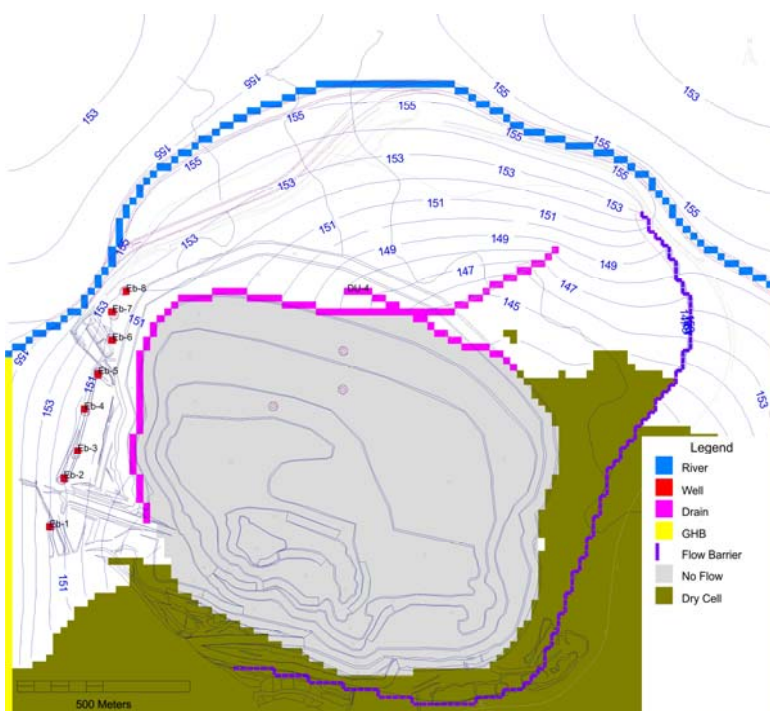
Slika III-43: Raspored pijezometarskog nivoa u aluvijalnoj izdani na kraju 2013. godine



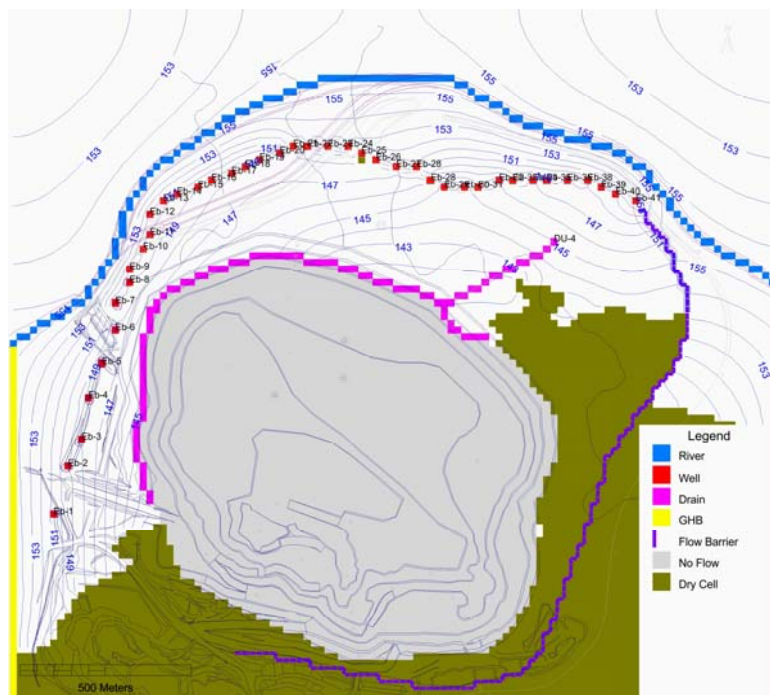
Slika III-44: Raspored pijezometarskog nivoa u aluvijalnoj izdani na kraju 2014. godine



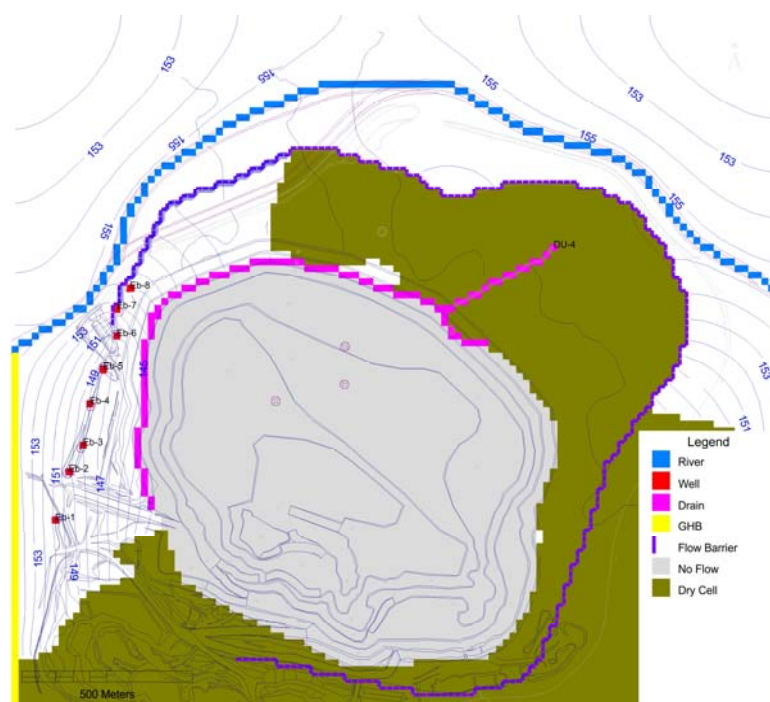
Slika III-45: Raspored pijezometarskog nivoa u aluvijalnoj izdani na kraju 2015. godine
(varijanta 1)



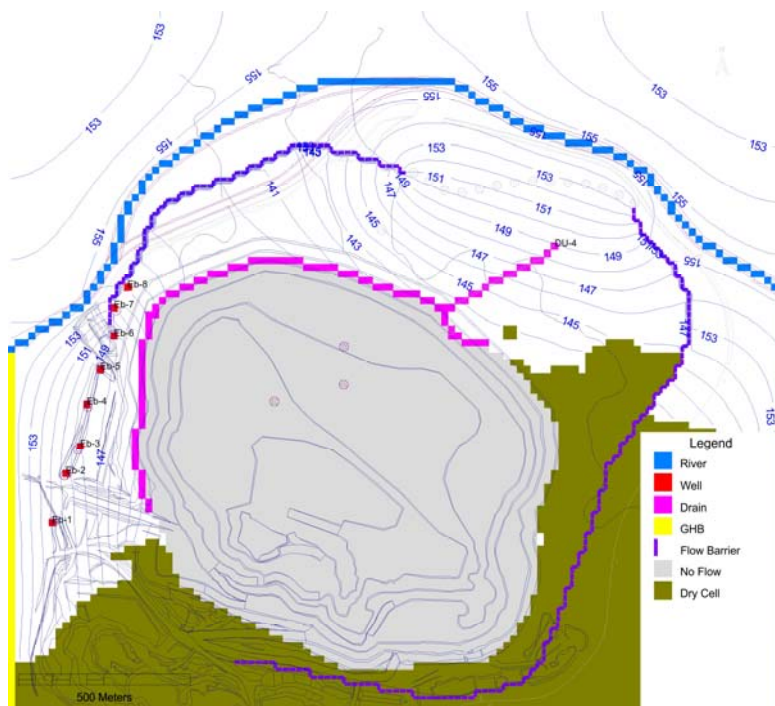
Slika III-46: Raspored pijezometarskog nivoa u aluvijalnoj izdani kraju 2015. godine
(varijanta 2 i 3)



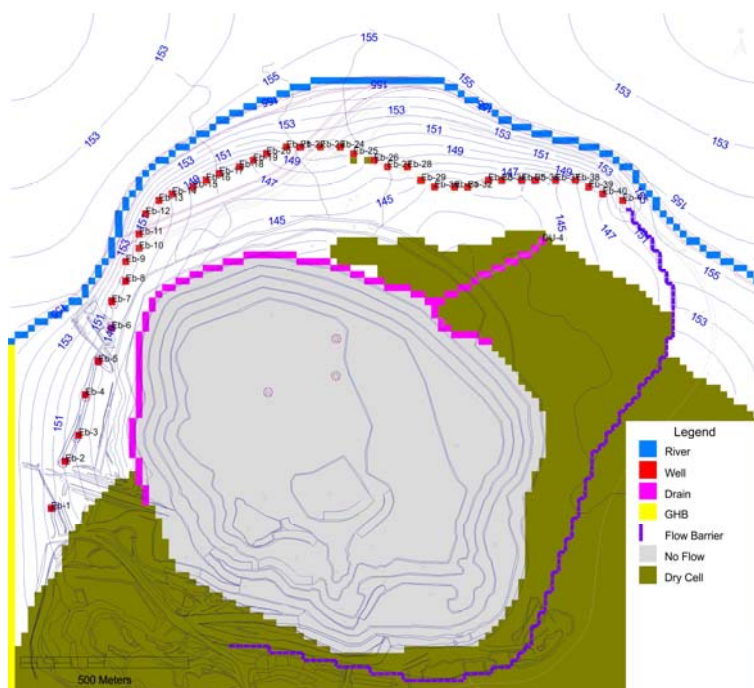
Slika III-47: Raspored pijezometarskog nivoa u aluvijalnoj izdani na kraju 2016. godine
(varijanta 1)



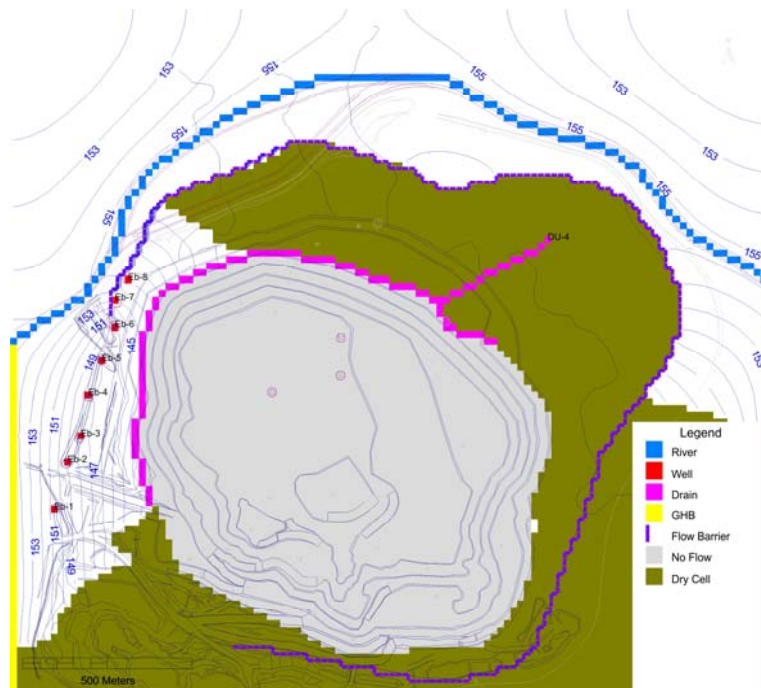
Slika III-48: Raspored pijezometarskog nivoa u aluvijalnoj izdani kraju 2016. godine
(varijanta 2)



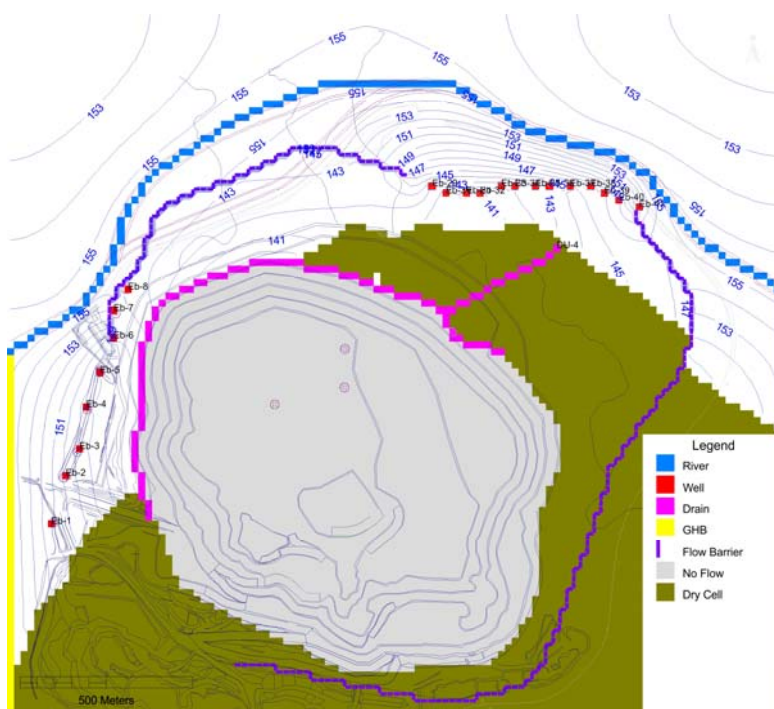
Slika III-49: Raspored pijezometarskog nivoa u u aluvijalnoj izdani na kraju 2016. godine (varijanta 3)



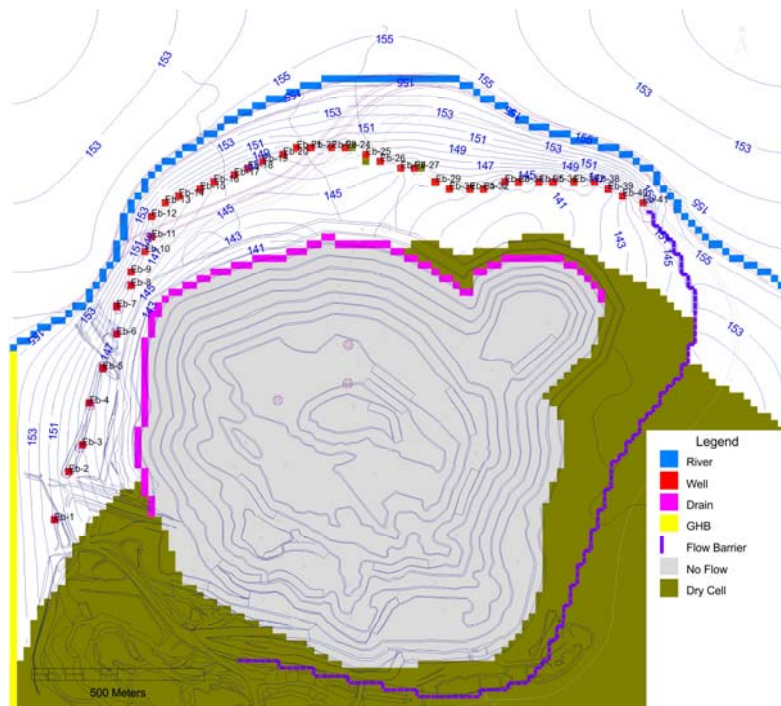
Slika III-50: Raspored pijezometarskog nivoa u aluvijalnoj izdani kraju 2017. godine (varijanta 1)



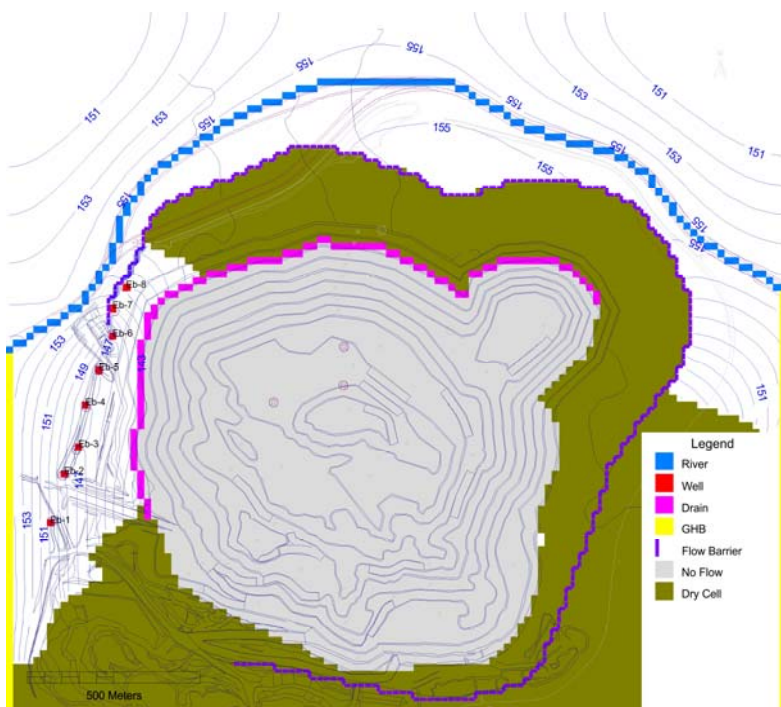
Slika III-51: Raspored pijezometarskog nivoa u aluvijalnoj izdani na kraju 2017. godine
(varijanta 2)



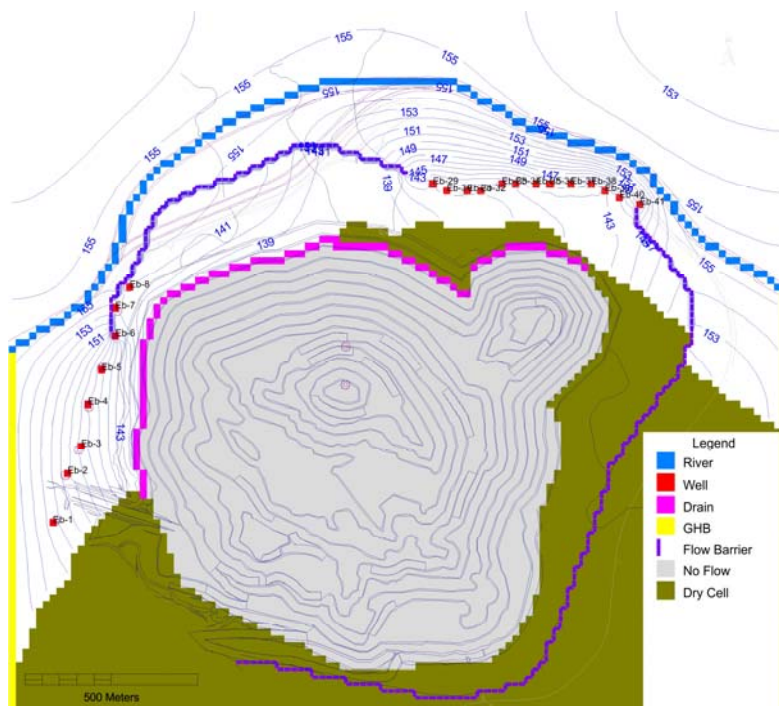
Slika III-52: Raspored pijezometarskog nivoa u aluvijalnoj izdani kraju 2017. godine
(varijanta 3)



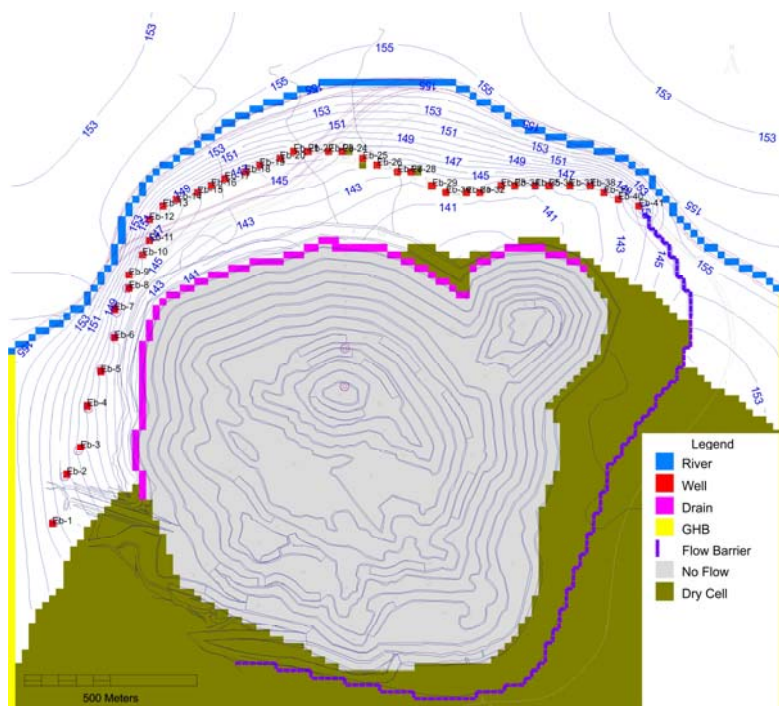
Slika III-53: Raspored pijezometarskog nivoa u aluvijalnoj izdani na kraju 2022. godine
(varijanta 1)



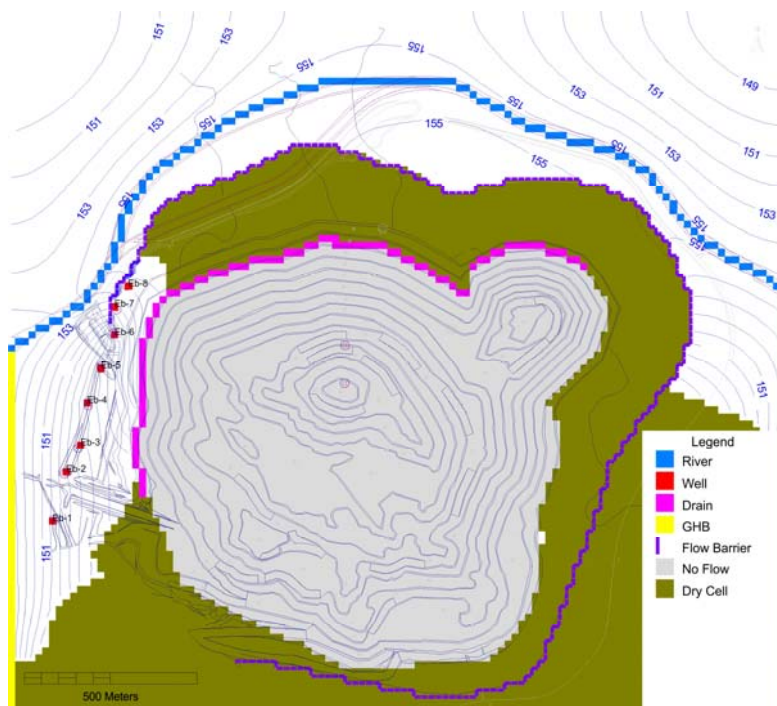
Slika III-54: Raspored pijezometarskog nivoa u u aluvijalnoj izdani kraju 2022. godine
(varijanta 2)



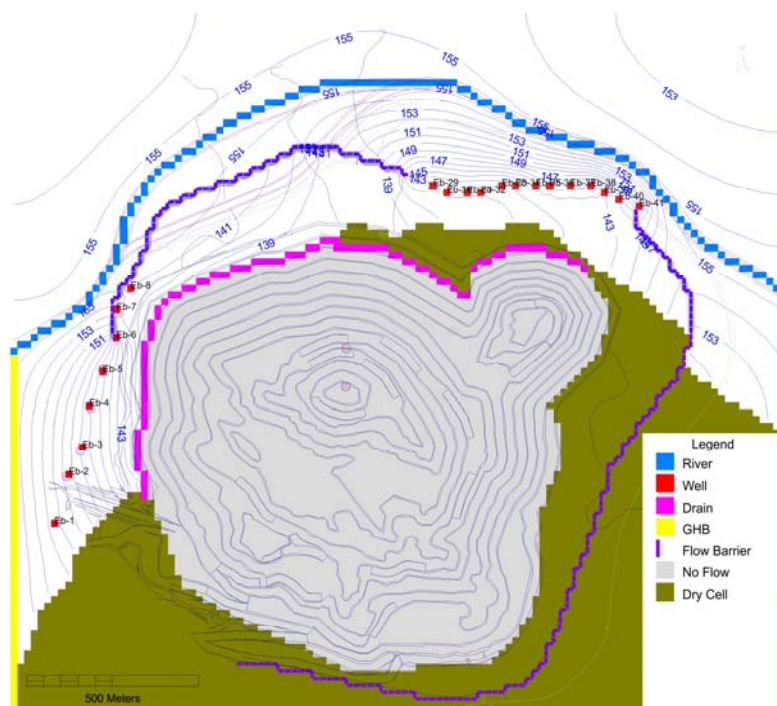
Slika III-55: Raspored pijezometarskog nivoa u u aluvijalnoj izdani na kraju 2022. godine (varijanta 3)



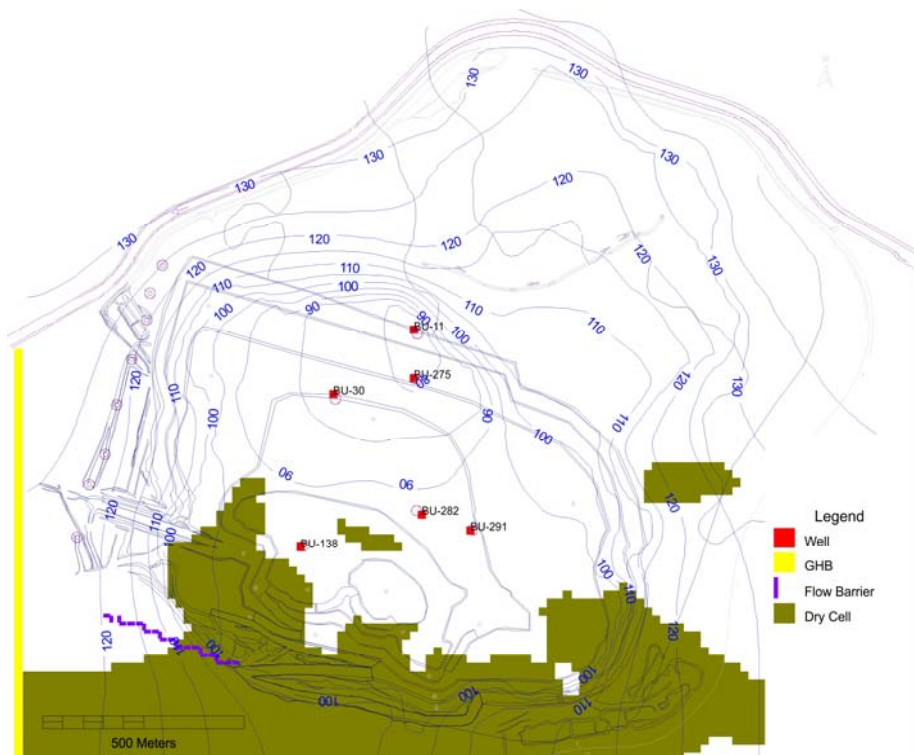
Slika III-56: Raspored pijezometarskog nivoa u u aluvijalnoj izdani na kraju 2024. godine (varijanta 1)



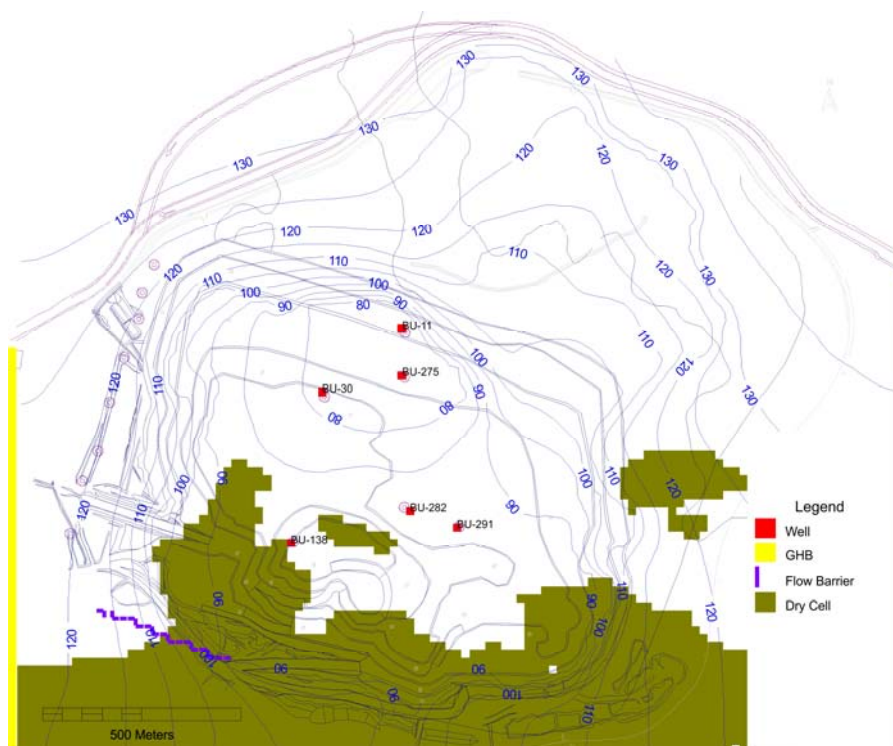
Slika III-57: Raspored pijezometarskog nivoa u u aluvijalnoj izdani na kraju 2024. godine (varijanta 2)



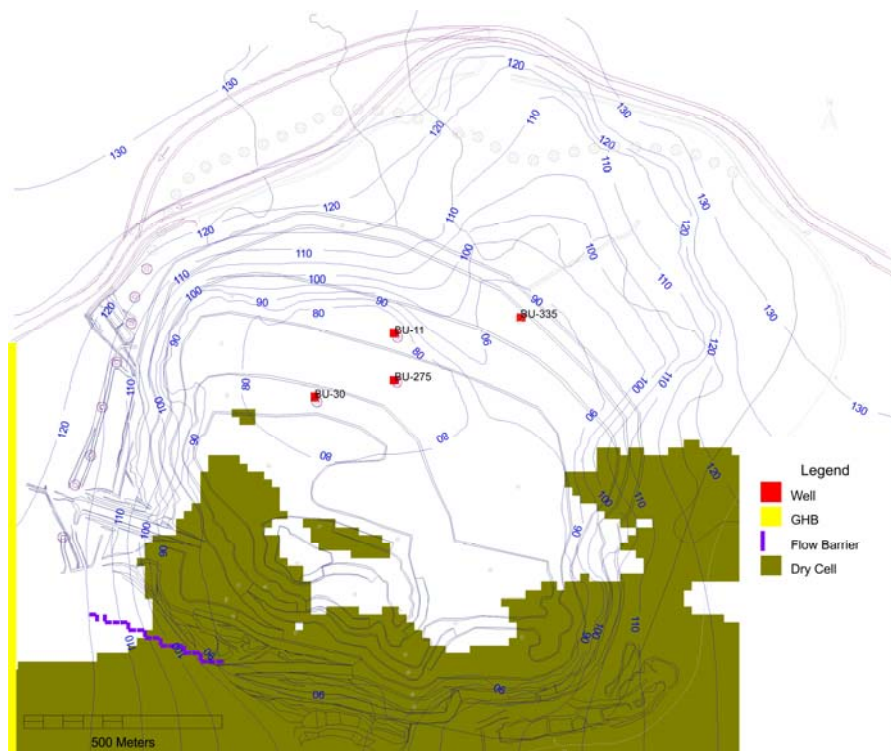
Slika III-58: Raspored pijezometarskog nivoa u u aluvijalnoj izdani na kraju 2024. godine (varijanta 3)



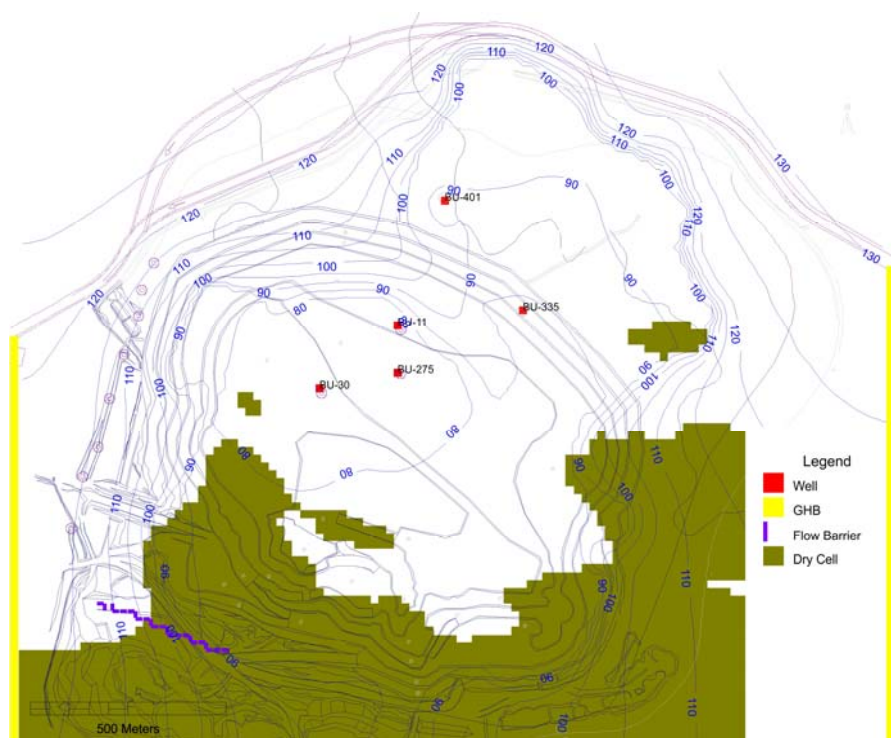
Slika III-59: Raspored pijezometarskog nivoa u rudnom telu na kraju 2013. godine



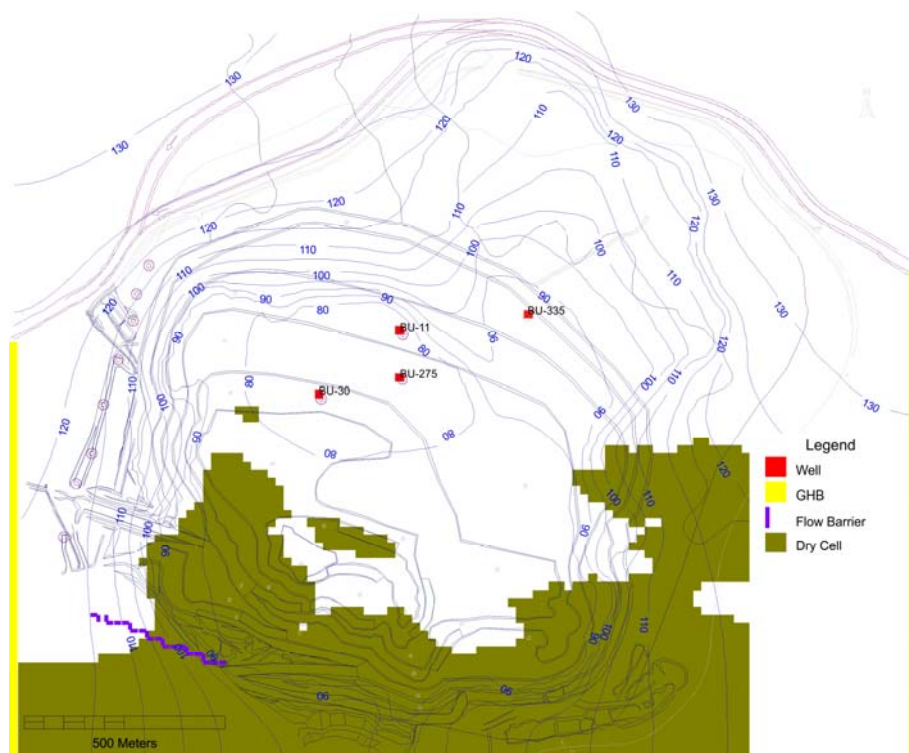
Slika III-60: Raspored pijezometarskog nivoa u u rudnom telu na kraju 2014. godine



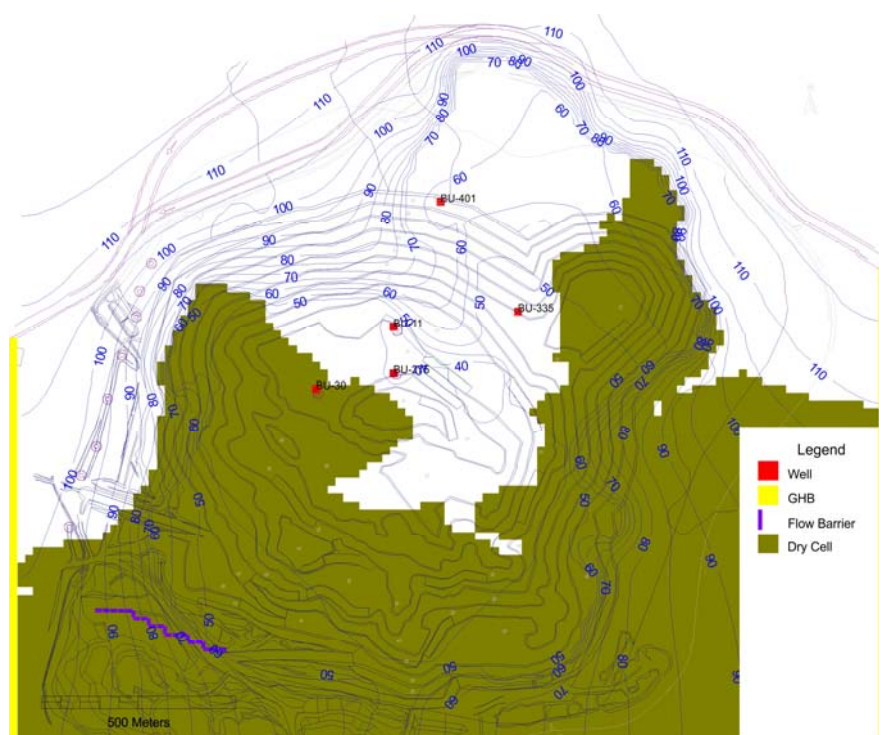
Slika III-61: Raspored pijezometarskog nivoa u u rudnom telu na kraju 2015. godine



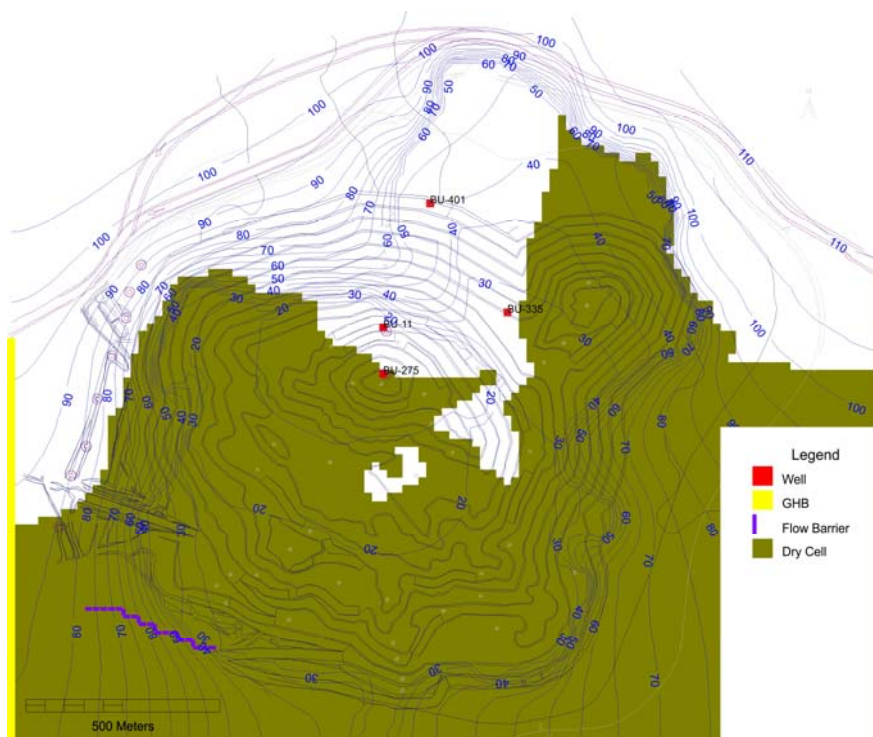
Slika III-62: Raspored pijezometarskog nivoa u u rudnom telu na kraju 2016. godine



Slika III-63: Raspored pijezometarskog nivoa u rudnom telu na kraju 2017. godine



Slika III-64: Raspored pijezometarskog nivoa u rudnom telu na kraju 2022. godine



Slika III-65: Raspored pijezometarskog nivoa u u rudnom telu na kraju 2024. godine

Pre analize postignutog obaranja nivoa podzemnih voda mora se ukazati na izvesnu neusklađenost između projektovane (skokovite) i realne (kontinualne) dinamike fronta, kao i na napredovanja konture kopa, koja moraju da se odraze i na prognozne proračune, te o pomenutom treba voditi računa prilikom tumačenja prikazanih rezultata. Ovo se najpre odnosi na dobijene rezultate po vremenskim presecima 2022. godine i 2024. godine, kada je i napravljen skok od pet godina, odnosno, skok od dve godine.

Analiza rasporeda pijezometarskih nivoa (slike III-43 – III-58) u **aluvijalnoj izdani** svakako upućuje na određene zaključke: evidentna je razlika između strujnih slika aluvijalne izdani za 2013. i 2014. godine, kada severno od kopa postoji samo drenažni usek DU-4, i to kao jedini objekat sistema odbrane kopa od doticaja voda sa severa, prvenstveno od Gomjenice, kao i za godine počev od 2015.godine, odnosno, 2016. godine, kada postoji jedan od tri simulirana sistema za odbranu od podzemnih voda. Uticaj sistema odbrane kopa od podzemnih voda manifestuje se preko različitih gradijenata pritiska unutar krajnjih kontura drenažnog sistema, kao i preko područja koja su izvan ove konture. Razlike u efektima odbrane kopa od podzemnih voda u aluvijalnoj izdani nisu zanemarljive, i to za svaku varijantu zaštite kopa.

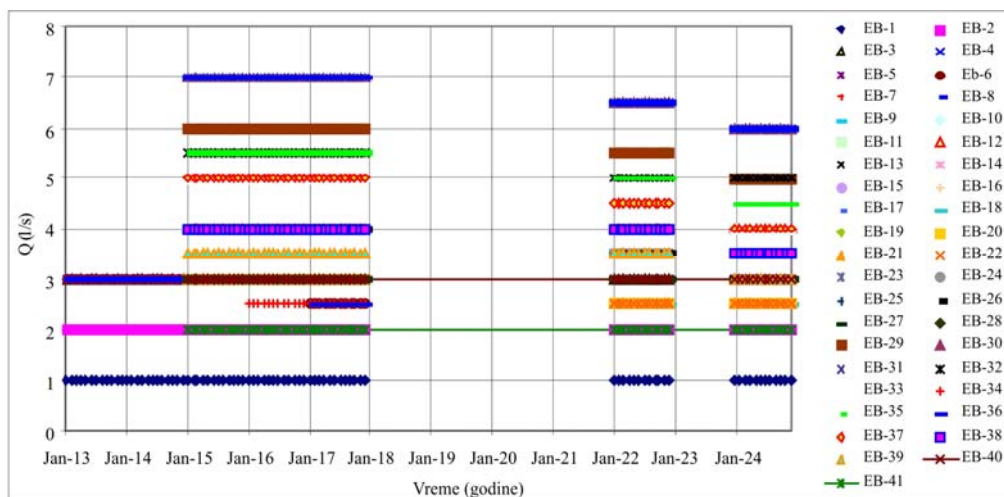
Prema prvoj simuliranoj varijanti odbrane kopa ukupno 41 savršen bunar čini drenažni sistem uz drenažni usek DU-4. Ova varijanta je najmanje efikasna u odnosu na analizirane varijante, stoga se njome nivo podzemnih voda ispred konture kopa najmanje obara.

Za razliku od prve varijante, drugi simulirani drenažni sistemi čine na zapadu drenažni bunari Eb-1 do Eb-8, vodonepropusni ekran na severu duž izmeštenog korita Gomjenice, i drenažni usek DU-4. Ovom varijantom odbrane površinskog kopa, usled hidrauličkog prekida doticaja podzemnih voda iz pravca Gomjenice, kroz aluvijalne naslage do kopa, dolazi veoma brzo do „sušenja“ aluvijalnih naslaga ispred severne konture kopa, čime i drenažni usek DU-4 relativno brzo gubi funkciju. Vremenom se „osušena“ površina širi, dok na severoistoku kopa ostaje uska zona duž koje ima doticaja u kop, kao posledica prolaska nezahvaćenih podzemnih voda drenažnom linijom bunara Eb-1 do Eb-8. Prema ostvarenim efektima odbrane, ova varijanta predstavlja najefikasniju za odbranu od priliva vode u kop kroz aluvijalne naslage.

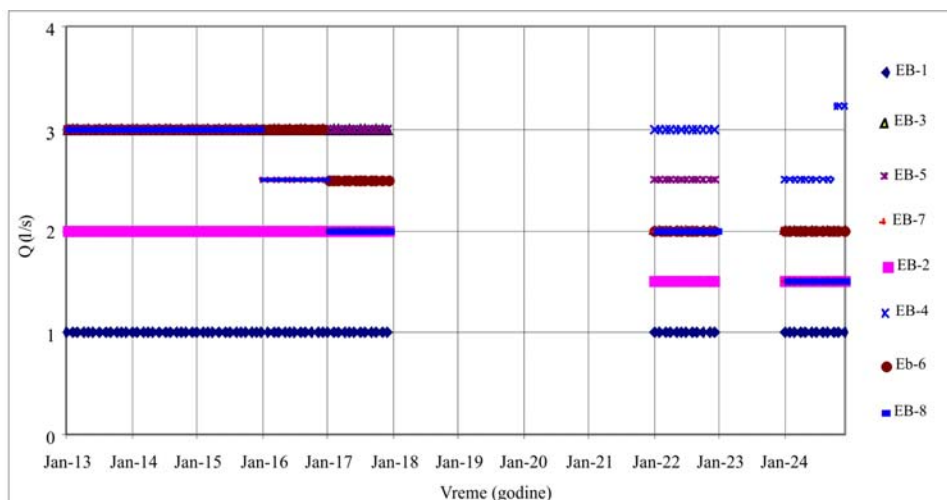
Trećom varijantom prognoznih proračuna simuliran je rad sistema zaštite od kopa koji predstavlja kombinaciju prethodna dva. Ovaj sistem odbrane sastoji se od postojećih drenažnih bunara Eb-1 do Eb-8 na zapadu, vodonepropusnog ekrana u delu ispred kopa gde je korito reke Gomjenice najbliže i drenažnih bunara Eb-29 do Eb-41 u produžetku ekrana na severu, kao i od drenažnog useka DU-4. Ostvareni efekti rada ovakvog sistema odbrane od priliva podzemnih voda nalaze se između prve i druge varijante.

Povodom dreniranja **rudnog tela**, generalno, zaključak je da se za sve tri analizirane varijante ostvaruju gotovo identična obaranja nivoa podzemnih voda, pa su stoga na slikama III-59 – III-65 prikazani nivoi podzemnih voda u rudnom telu koji važe za sve tri varijante. Dobijene razlike po varijantama odnose se samo na kapacitete pojedinih bunara, a navedeno je posledica identičnog drenažnog sistema u rudnom telu za sve tri varijante. Takođe, obaranje nivoa podzemnih voda u rudnom telu je po svim varijantama i za svaku analiziranu godinu ispod kote radne etaže, što je jedan od preduslova za nesmetane rudarske aktivnosti.

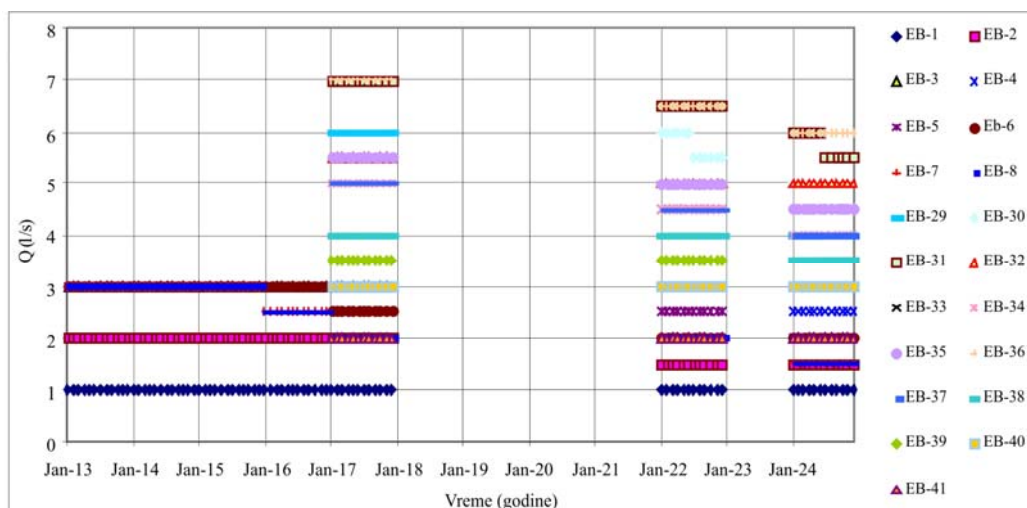
Bilans drenažnih bunara posebno je analiziran za aluvijalnu izdan i za izdan u rudnom telu. Na slikama III-66 – III-68 prikazani su hidrogrami crpljenja drenažnih bunara u aluvijalnoj izdani, potom, u tabelama III-11 – III-13 prikazani su početni, srednji i završni kapaciteti drenažnih bunara u aluvijalnoj izdani, a na slici III-79 doticaj u drenažni usek DU-4 za sve varijante i za ceo analizirani vremenski period odbrane površinskog kopa od podzemnih voda.



Slika III-66: Hidrogram crpljenja drenažnih bunara u aluvijalnoj izdani (01.2013 - 12.2024. god.) - varijanta 1



Slika III-67: Hidrogram crpljenja drenažnih bunara u aluvijalnoj izdani (01.2013 - 12.2024. god.) - varijanta 2



Slika III-68: Hidrogram crpljenja drenažnih bunara u u aluvijalnoj izdani (01.2013 - 12.2024. god.) - varijanta 3

Tabela III-11: Prikaz vrednosti početnih, srednjih i završnih kapaciteta drenažnih bunara u aluvijalnoj izdani (01.2013 - 12.2024. god.) - varijanta 1

Bunar	$Q_{poč}$	Q_{sr}	Q_{zav}	Bunar	$Q_{poč}$	Q_{sr}	Q_{zav}
EB-1	1	1	1	EB-22	3	2.8	2.5
EB-2	2	2	2	EB-23	4	3.7	3
EB-3	3	3	3	EB-24	4	3.7	3
EB-4	3	3	3	EB-25	4	3.7	3
EB-5	3	3	3	EB-26	4	3.7	3
EB-6	3	2.79	2.5	EB-27	3	3	3
EB-7	3	2.71	2.5	EB-28	3	3	3
EB-8	3	2.79	2.5	EB-29	6	5.7	5
EB-9	4	3.7	3	EB-30	7	6.7	6
EB-10	4	3.7	3	EB-31	7	6.7	6
EB-11	4	4	4	EB-32	5.5	5.3	5
EB-12	4	4	4	EB-33	5	4.7	4
EB-13	4	3.8	3.5	EB-34	5	4.7	4
EB-14	4	3.8	3.5	EB-35	5.5	5.2	4.5
EB-15	4	3.8	3.5	EB-36	7	6.7	6
EB-16	4	3.8	3.5	EB-37	5	4.7	4
EB-17	3	2.8	2.5	EB-38	4	3.9	3.5
EB-18	3	2.8	2.5	EB-39	3.5	3.4	3
EB-19	3	2.8	2.5	EB-40	3	3	3
EB-20	3	2.8	2.5	EB-41	2	2	2
EB-21	3	2.8	2.5				

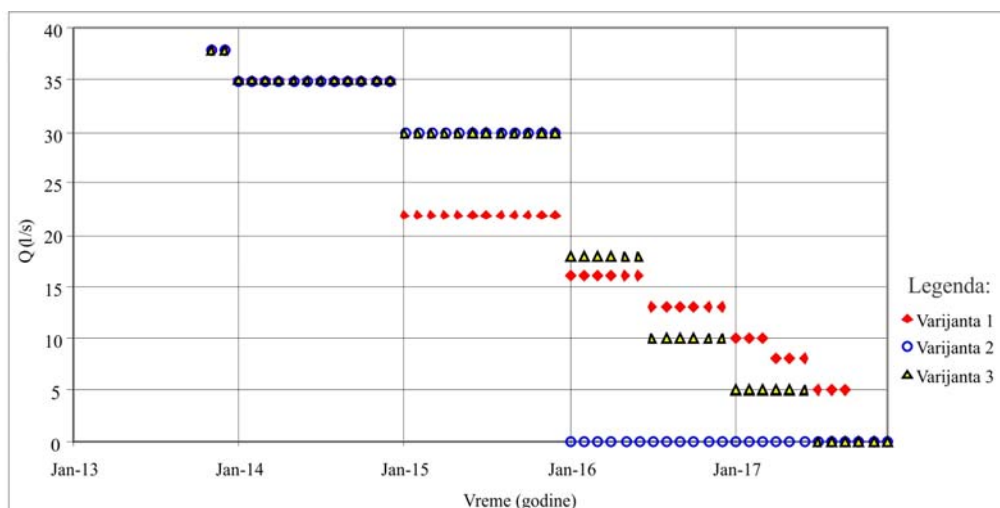
Tabela III-12: Prikaz vrednosti početnih, srednjih i završnih kapaciteta drenažnih bunara u aluvijalnoj izdani (01.2013 - 12.2024. god.) - varijanta 2

Bunar	$Q_{poč}$	Q_{sr}	Q_{zav}
EB-1	1	1	1
EB-2	2	1.86	1.5
EB-3	3	2.71	2
EB-4	3	2.93	2.5
EB-5	3	2.79	2
EB-6	3	2.64	2
EB-7	3	2.43	1.5
EB-8	3	2.43	1.5

Tabela III-13: Prikaz vrednosti početnih, srednjih i završnih kapaciteta drenažnih bunara u aluvijalnoj izdani (01.2013 - 12.2024. god.) - varijanta 3

Bunar	$Q_{poč}$	Q_{sr}	Q_{zav}	Bunar	$Q_{poč}$	Q_{sr}	Q_{zav}
EB-1	1	1	1	EB-32	5.5	5.17	5
EB-2	2	1.86	1.5	EB-33	5	4.5	4
EB-3	3	2.71	2	EB-34	5	4.5	4
EB-4	3	2.93	2.5	EB-35	5.5	5	4.5
EB-5	3	2.79	2	EB-36	7	6.5	6
EB-6	3	2.64	2	EB-37	5	4.5	4
EB-7	3	2.43	1.5	EB-38	4	3.83	3.5
EB-8	3	2.43	1.5	EB-39	3.5	3.33	3
EB-29	6	4.83	3.5	EB-40	3	3	3
EB-30	7	5.83	4.5	EB-41	2	2	2
EB-31	7	6.42	5.5				

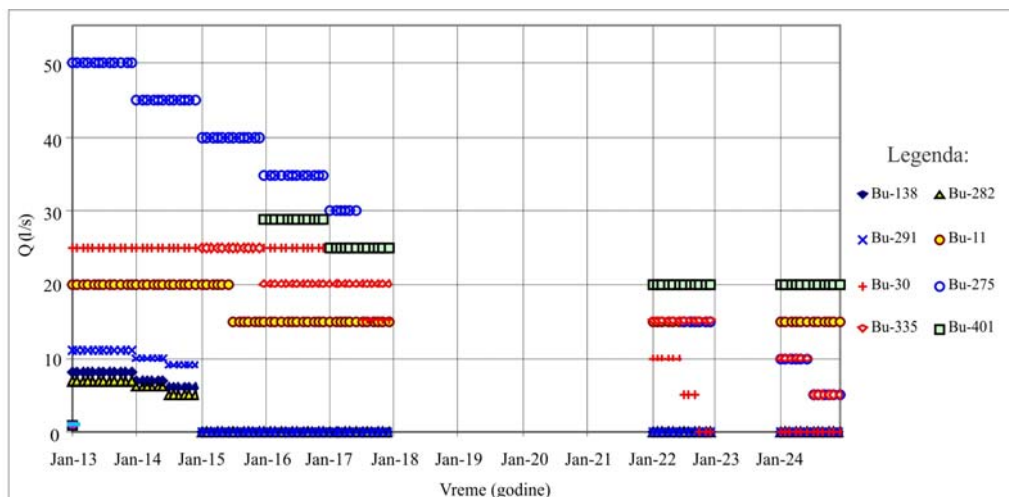
Za sve analizirane varijante zaštite kopa od podzemnih voda određen je i doticaj podzemnih voda aluvijalne izdani u drenažni usek DU-4 (slika III-72).



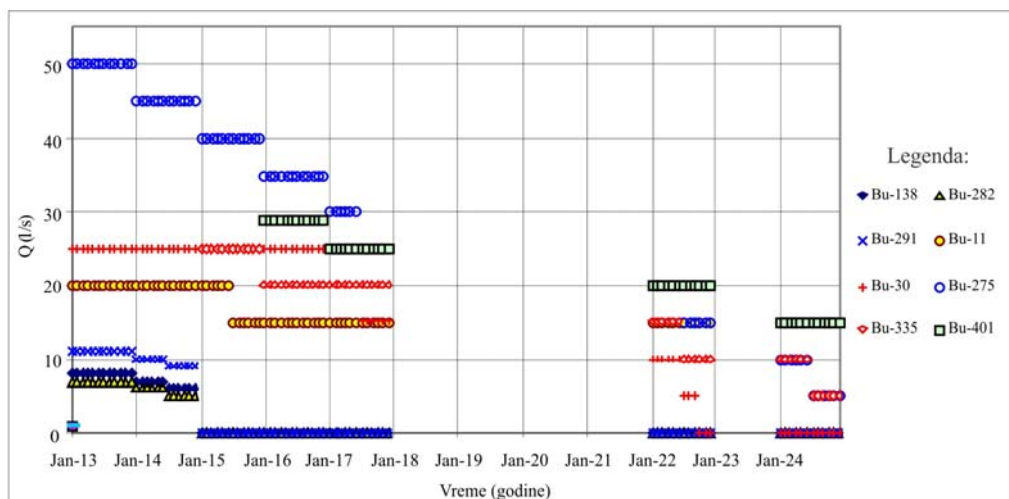
Slika III-69: Doticaj u drenažni usek DU-4 po svim varijantama (za period 01.2013 - 12.2017. god.)

Zajedničko za sve tri analizirane varijante sistema zaštite kopa od podzemnih voda iz **aluvijalne izdani** je postojanje drenažne linije bunara Eb-1 do Eb-8 na zapadu. U prvoj varijanti ovi bunari zadržavaju veće pojedinačne kapacitete u odnosu na naredne varijante, i to se javlja kao posledica odsustva vodonepropusnog ekrana. U varijantama 2 i 3 najveće razlike u kapacitetima bunara javljaju se kod onih najbližih vodonepropusnom ekranu (Eb-7 i Eb-8), a kao posledica ograničenog doticaja vode ka bunarima. U ovim varijantama kapaciteti bunara su manji za 40% na kraju proračunskog perioda, i to u odnosu na varijantu 1. Slična pojava se javlja i kod drugih bunara koji su u blizini vodonepropusnog ekrana u varijanti 3 (bunari Eb-29 i Eb-30). Na bunare Eb-38 do Eb-41 u varijanti 3 blizina ekrana ne utiče na znatnije opadanje kapaciteta ovih bunara, i to zbog blizine izmeštenog korita Gomjenice i malih kapaciteta bunara. Uloga drenažnog useka DU-4 je promenljiva u odnosu na varijantu sistema zaštite, a svrsishodnost njegove izrade nalazi se u početnim godinama prognoznih proračuna, gde, izuzev njega i drenažnih bunara na zapadu (bunari Eb-1 do Eb-8), ne postoje drugi objekti za odbranu kopa od priliva podzemnih voda iz aluvijona. U odnosu na dinamiku izgradnje drenažnih objekata prema analiziranim varijantama, doticaj u usek je promenljiv, tako što je najmanji za varijantu 2, dok je najveći doticaj u usek vidan po varijanti 1.

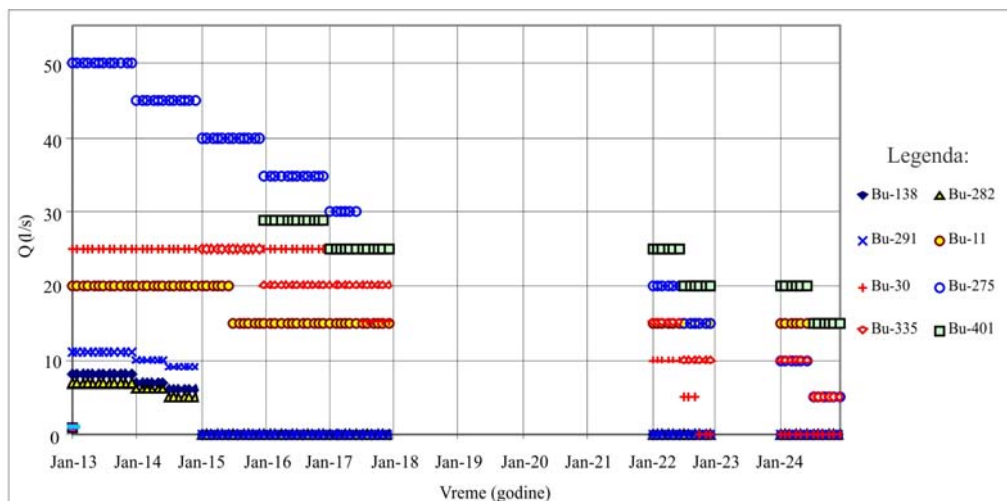
Na slikama III-70 – III-72 su prikazani hidrogrami crpenja drenažnih bunara u **rudnom telu**, a u tabelama III-14 – III-16 početni, srednji i završni kapaciteti drenažnih bunara u rudnom telu za sve varijante odbrane kopa od podzemnih voda, i to za ceo analizirani vremenski period.



Slika III-70: Hidrogram crpljenja drenažnih bunara u rudnom telu (01.2013 - 12.2024. god.) - varijanta 1



Slika III-71: Hidrogram crpljenja drenažnih bunara u rudnom telu (01.2013 - 12.2024. god.) - varijanta 2



Slika III-72: Hidrogram crpljenja drenažnih bunara u rudnom telu (01.2013 - 12.2024. god.) - varijanta 3

Tabela III-14: Prikaz vrednosti početnih, srednjih i završnih kapaciteta drenažnih bunara u rudnom telu (01.2013 - 12.2024. god.) - varijanta 1

Bunar	$Q_{poč}$	Q_{sr}	Q_{zav}
Bu-138	8	7.25	6
Bu-282	7	6.25	5
Bu-291	11	10.25	9
Bu-11	20	16.79	15
Bu-30	25	20.63	0
Bu-275	50	31.79	5
Bu-335	25	17.5	5
Bu-401	29	23.5	20

Slika III-15: Prikaz vrednosti početnih, srednjih i završnih kapaciteta drenažnih bunara u rudnom telu (01.2013 - 12.2024. god.) - varijanta 2

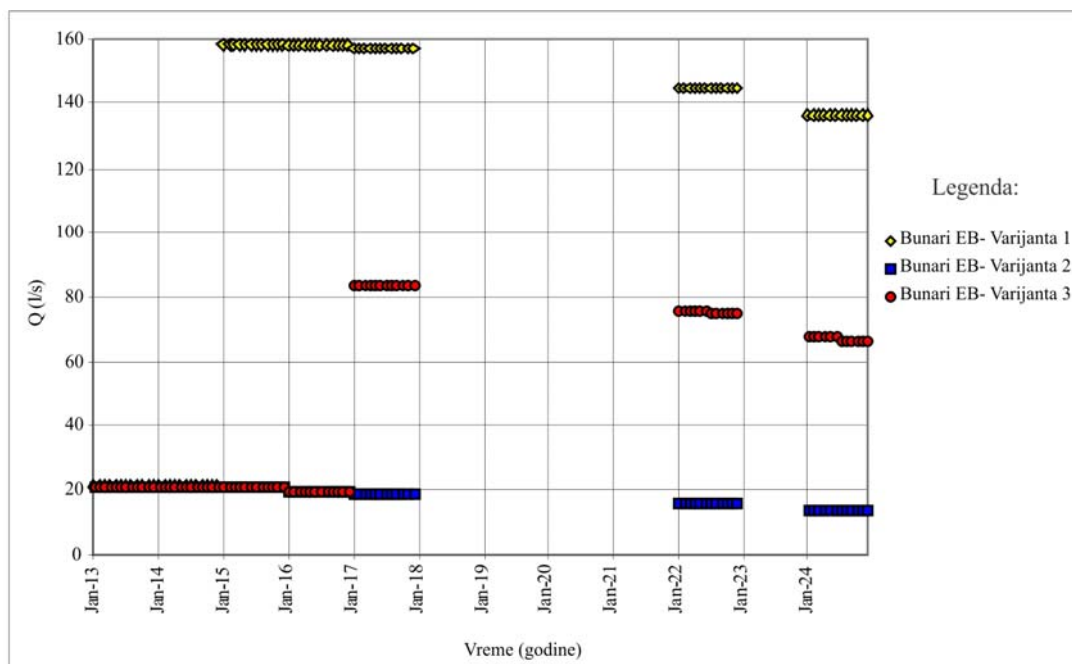
Bunar	$Q_{poč}$	Q_{sr}	Q_{zav}
Bu-138	8	7.25	6
Bu-282	7	6.25	5
Bu-291	11	10.25	9
Bu-11	20	16.79	15
Bu-30	25	20.63	0
Bu-275	50	31.79	5
Bu-335	25	17	5
Bu-401	29	22.25	15

Tabela III-16: Prikaz vrednosti početnih, srednjih i završnih kapaciteta drenažnih bunara u rudnom telu (01.2013 - 12.2024. god.) - varijanta 3

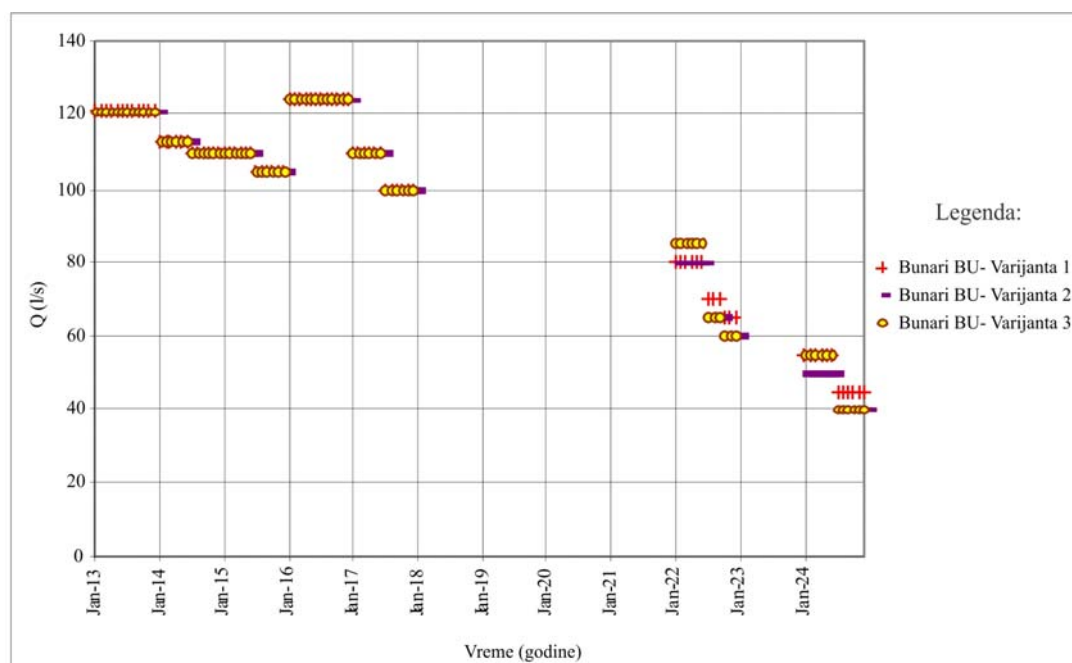
Bunar	$Q_{poč}$	Q_{sr}	Q_{zav}
Bu-138	8	7.25	6
Bu-282	7	6.25	5
Bu-291	11	10.25	9
Bu-11	20	16.786	15
Bu-30	25	20.625	0
Bu-275	50	31.786	5
Bu-335	25	17	5
Bu-401	29	23.5	15

Opšta karakteristika bilansa drenažnih bunara u rudnom telu proističe iz komentara o ostvarenim nivoima podzemnih voda u rudnom telu, a odnosi se na: identičan broj bunara, raspored bunara, inicijalne kapacitete bunara i vreme aktiviranja bunara u rudnom telu po svim analiziranim varijantama. Valja napomenuti da su razlike između varijanti zaštite kopa po pitanju bilansa bunara u rudnom telu gotovo zanemarljive. Za razliku od bunara u aluvijalnim naslagama, jedan broj bunara u izdani u rudnom telu i posle periodičnog skraćivanja ispada iz rada, i to kao posledica generalnog obaranja nivoa podzemnih voda. Takođe, na nekoliko bunara dolazi do opadanja početnog kapaciteta u iznosu od 30%, uz napomenu da su značajno veći inicijalni kapaciteti bunara u rudnom telu, nego u bunarima u aluvijalnoj izdani.

Na slikama III-73 i III-74 prikazani su uporedni dijagrami ukupne izdašnosti drenažnih bunara u aluvijalnoj izdani i izdani u rudnom telu.



Slika III-73: Uporedni dijagram ukupne izdašnosti drenažnih bunara u aluvijalnoj izdani (01.2013 - 12.2024. god.) po svim varijantama



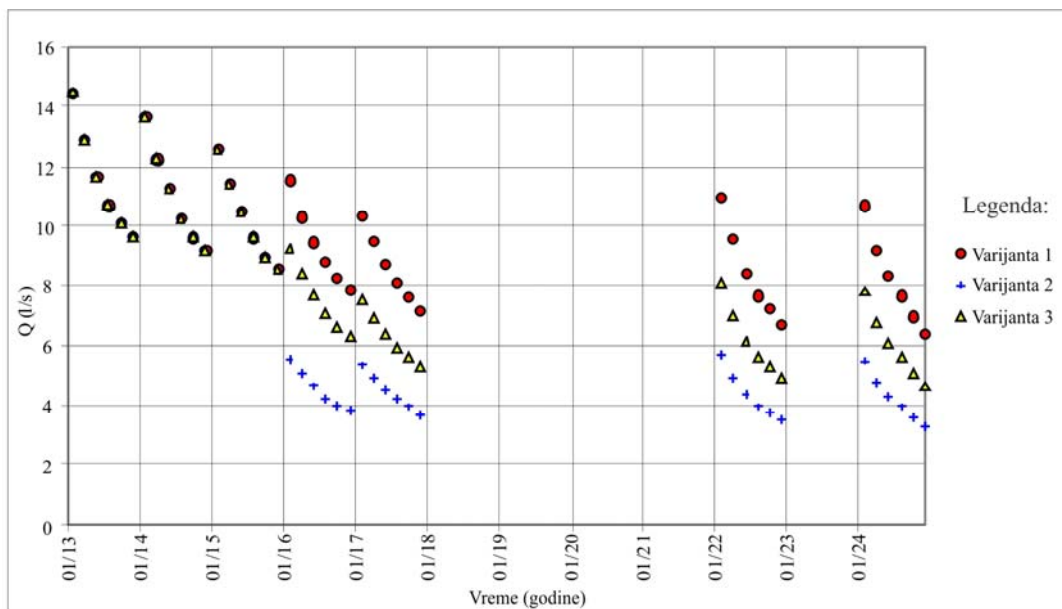
Slika III-74: Uporedni dijagram ukupne izdašnosti drenažnih bunara u rudnom telu (01.2013 - 12.2024. god.) po svim varijantama

Ukupni kapaciteti bunara u aluvijalnim naslagama se razlikuju od varijante odbrane površinskog kopa, te je razumljivo da su najveći u prvoj varijanti, u kojoj i ima najviše drenažnih bunara, a samim tim da su najmanji u drugoj, gde je najmanji broj drenažnih bunara.

Za razliku od ukupnih proticaja bunara u aluvijalnim naslagama, bunari u rudnom telu imaju, kako je i navedeno, skoro identične promene kapaciteta.

Zajedničko za bunare u rudnom telu i u aluvijalnoj izdani je postojanje trenda smanjenja proticaja, i to kao posledice obaranja nivoa podzemnih voda u njihovoj blizini. Određeni skok ukupnog kapaciteta bunara u izdani u rudnom telu u periodu od 2013. do 2024. god. posledično se javlja, s obzirom na uključenja novih bunara u rad (slika III-74).

Za prognozni period (01.2013. - 12.2024. god.) izračunata je i veličina isticanja podzemnih voda iz kosine radnih etaža, a dobijeni rezultati su prikazani intervalom od dva meseca (slika III-75).



Slika III-75: Uporedni dijagram isticanja podzemnih voda iz kosine etaže duž fronta napredovanja kopa (01.2013 - 12.2024. god.) prema svim varijantama

Može se videti da su dobijeni rezultati, prikazani na slici III-75, posledica sledećih faktora: usvojene šematizacije modela, dinamike napredovanja fronta otkopavanja, dinamike isključenja pojedinih bunara, kao i intenziteta smanjenja pojedinačnih kapaciteta bunara (Polomčić & Bajić, 2015.), pa shodno tome:

- prema usvojenoj dinamici položaj fronta napredovanja kopa se pomera skokovito, za jednu, za dve ili za pet godina;
- za referentni položaj usvojeno je stanje na kraju godine (31.12.), i to za svaku godinu proračuna;
- položaj drenažnih linija bunara se u hidrodinamičkim proračunima zadaje 01.01. tekuće godine, a traje do 31.12.;
- 01.01.2013. god. linija fronta napredovanja se skokovito pomera na lokaciju, definisanu datumom 31.12.2013. god., a zbog onoga što je navedeno u proračunima dolazi do naglog povećanja drenažnog isticanja, što u realnim uslovima nije u toj meri izraženo, pa stoga ovo važi za svaki analizirani vremenski presek i posledica je načina zadavanja napredovanja fronta rudarskih radova.

Kao zaključak se ističe da su hidrodinamičkom analizom, pored prikazanih karakteristika definisanih sistema odbrane od podzemnih voda, simulirani i efekti obaranja nivoa podzemnih voda za sve razmatrane varijante. Obično se do sada u praksi, nakon prikazanih varijantnih rešenja dobijenih hidrodinamičkom analizom, vršio izbor „najbolje“ varijante uopštenom ekonomskom analizom, gde se pritom biralo najekonomičnije rešenje, no bez analize ostalih faktora, kao što su tehnički ili ekološki faktora, te se to neretko odrazilo lošim uticajem na okolinu. Kako bi se odabrala optimalna varijanta sistema odbrane od podzemnih voda, potrebno je izvršiti analizu svih faktora koji imaju uticaj na taj izbor, što je prikazano u narednom poglavlju. Nakon pomenutog, optimizacionim proračunima prema metodi fazi analitičko hijerarhijskog procesa (FAHP), a korišćenjem trouglastih fazi brojeva, donesena je konačna odluka o optimalnoj varijanti sistema odbrane od podzemnih voda na površinskom kopu „Buvač“.

6. Fazi optimizacija - izbor optimalnog sistema odbrane površinskog kopa „Buvač“ od podzemnih voda

Nadalje u tekstu je prikazana fazi optimizacija za potrebe utvrđivanja optimalne varijante sistema odbrane od podzemnih voda na površinskom kopu „Buvač“, kao i proračuni izvršeni prema osnovnim koracima metode fazi analitičko hijerarhijskog procesa (Deng, 1999), koji su detaljno opisani u poglavlju II-3.7.4.

6.1. Faktori koji utiču na izbor sistema odbrane od podzemnih voda

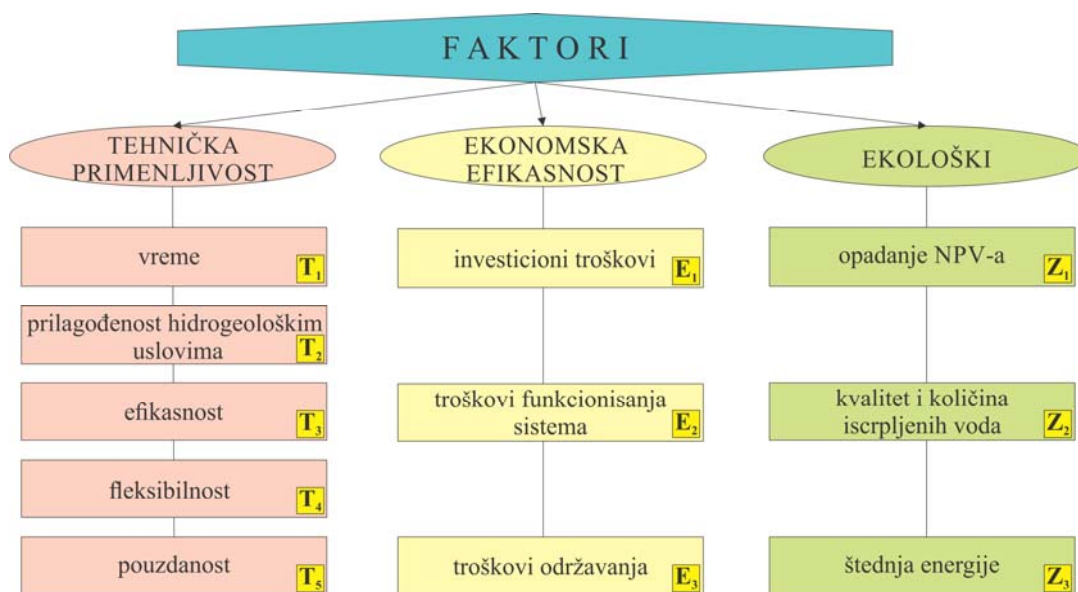
Prema prvom opisanom koraku u poglavlju II-3.7.4, koji se odnosi na metodu Deng-a (1999), razmotreni su postavljeni problem i cilj, a definisani su i faktori: kriterijumi i podkriterijumi koji utiču na izbor optimalne alternative. Osnovni problem u vezi sa površinskim kopom „Buvač“ predstavlja odbrana od podzemnih voda iz aluvijalne izdani i izdani u limonitskom rudnom telu. Hidrodinamičkom analizom definisana su tri različite alternative, tj. tri različita sistema odbrane od podzemnih voda, što podrazumeva opis njegovih karakteristika, broja drenažnih objekata i njihovog rasporeda, kao i vreme koje je potrebno za maksimalne efekte snižavanja nivoa podzemnih voda, a potom i efekti rada sistema u funkciji obaranja pijezometarskih nivoa. Prema tome, sistem odbrane od podzemnih voda se navedenim redom sastoji za svaku alternativu od sledećih komponenti:

- alternativa 1: drenažnih bunara (slika III-40),
- alternativa 2: vodonepropusnog ekrana (slika III-41) i
- alternativa 3: kombinacija drenažnih bunara i vodonepropusnog ekrana (slika III-42).

Proračunima fazi optimizacije i donošenjem optimalne odluke postignut je primarni cilj koji se odnosi na izbor optimalnog sistema odbrane od podzemnih voda, a prema izdvojenim kriterijumima.

Shodno sopstvenim dosadašnjem iskustvima sa hidrogeološkim istraživanjima, potom i proučavanjem naučne literature iz oblasti hidrogeologije ležišta mineralnih sirovina (Libicki 1985; Morton and van Mekerck 1993; Younger et al. 2002; Hartman and Mutmanský 2002; Younger 2007), kao i poznavanjem pomenutih najznačajnijih faktora iz oblasti nauke i inženjerstva koji se bave vodnim resursima (poglavlje II-3.7.1), za potrebe projektovanja sistema odbane od podzemnih voda na istražnom terenu površinskog kopa „Buvač” izdvojena su tri kriterijuma, značajna za fazi optimizaciju u hidrodinamičkoj analizi (slika III-76):

- tehnička primenljivost,
- ekonomska efikasnost i
- ekološki kriterijumi.



Slika III-76: Faktori uticaja na izbor optimalnog sistema za odbranu od podzemnih voda na primeru površinskog kopa „Buvač”

Izdvojeni kriterijumi se dalje dele na podkriterijume, a u vezi sa predmetnom problematikom, javlja se jedanaest podkriterijuma:

- tehnički kriterijumi:

- **vreme** koje predstavlja potrebno vreme da se nivo podzemnih voda spusti na projektovani nivo. U slučaju površinskog kopa „Buvač” nivo podzemnih voda treba da se obori na minimalno 15 m ispod trenutne radne etaže, a za period rada kopa od 2013 - 2024. god., uz napomenu da je jednako za sve varijante dobijene hidrodinamičkim prognoznim proračunima. S druge strane, vreme koje će se ovde razmatrati je vreme „odvajanja” od zajedničke osnove dinamike rada sistema odbrane od podzemnih voda, ali i samostalni razvoj po varijantama (tabela III-8), a samim tim i uključenje pojedinih elemenata sistema odbrane od podzemnih voda za sve varijante. Tokom 2013. i 2014. god. postoji prvobitan sistem odbrane, zajednički za sve tri varijante, a od 2015. god. sistem startuje, i to prema varijanti 1. Nadalje, sistem odbrane, prema varijanti 2, startuje od 2016. godine, a prema varijanti 3, vodonepropusni ekran startuje od 2016. godine, dok bunari startuju od 2017. godine.
- **prilagođenost hidrogeološkim uslovima** koje se odnosi na izbor elemenata sistema za odbranu od priliva podzemnih voda, njihove prednosti i mane prilikom izgradnje, kao i funkcionisanje u zavisnosti od hidrogeoloških karakteristika izučavanog terena. Detaljan prikaz karakteristika elemenata sistema odbrane od podzemnih voda, koje predstavljaju bunari i vodonepropusni ekrani, nalazi se u poglavlju II-1.4, gde su naznačene njihove prednosti i nedostaci.
- **efikasnost (primenjena metoda odbrane i iskustva sa sistemom za odbranu od podzemnih voda)** koje predstavlja dosadašnja iskustva sa sistemom odbrane od podzemnih voda i njegovim elementim, u cilju postizanja optimalnog rešenja za odbranu od podzemnih voda, stoga, i u cilju prevencije negativnih posledica. Analizom rasporeda pijezometarskih nivoa (slike III-43 – III-65) ustanovljeno je da se po efikasnosti varijante dosta razlikuju. Uticaj sistema odbrane kopa od podzemnih voda manifestuje se različitim gradijentima pritiska, i to unutar krajnjih kontura drenažnog sistema i područja izvan ove konture, otuda: varijanta 1 je najmanje efikasna

i njome se nivo podzemnih voda ispred konture kopa najmanje obara, varijantom 2, usled hidrauličkog prekida doticaja podzemnih voda iz pravca Gomjenice kroz aluvijalne naslage do kopa, dolazi se veoma brzo do „sušenja“ aluvijalnih naslaga ispred severne konture kopa, te i drenažni usek DU-4 relativno brzo biva nefunkcionalan. Uzev u obzir ostvarene efekte odbrane, varijanta 2 predstavlja najefikasniju varijantu za odbranu od priliva vode u kop kroz aluvijalne naslage, dok se ostvareni efekti rada sistema odbrane podzemnih voda prema varijanti 3 nalaze između varijante 1 i varijante 2.

- **fleksibilnost** koje predstavlja prilagodljivost sistema za odbranu od podzemnih voda usled mogućih izmena njegovih karakteristika. Pitanje koje se postavlja glasi: „Da li se izrađeni sistem za odbranu od podzemnih voda može promeniti?“ To se može učiniti dodavanjem novih elemenata ili isključenjem postojećih elemenata sistema odbrane od podzemnih voda. U ovom slučaju navedeno predstavlja npr. mogućnost isključivanja nekog drenažnog bunara iz funkcije ili pak promenu kapaciteta ugradnjom različitih vrsta pumpi.
- **pouzdanost** koja predstavlja verovatnoću da će sistem raditi uspešno. Pitanje koje se postavlja glasi: „Da li će sistem za odbranu od podzemnih voda obezbediti apsolutnu sigurnost ili sigurnost određenog stepena uz izvesnu dozu rizika?“ Pritom se misli na sigurnost odbrane od podzemnih voda površinskog kopa, gde, takođe, spada i stepen rizika od ugrožavanja ljudstva i životne sredine, u domenu tehničkih karakteristika sistema, pošto kod pojedinih sistema odbrane usled havarije ili tehničkih nedoslednosti dolazi do znatnog negativnog uticaja u pomenutim kategorijama.

- ekonomski kriterijumi:

- **investicioni troškovi** koji se odnose na vrstu objekta, njegove karakteristike, broj objekata, prateću opremu i jediničnu cenu objekta,
- **troškovi funkcionisanja sistema** koji se odnose na utrošak energije, troškove radne snage i sl.,

- **troškovi održavanja** koji se odnose na zamenu i popravke objekata i opreme i monitoring.

Opšte uzev, sistemi odbrane sačinjeni od vodonepropusnih ekrana predstavljaju najskuplje sisteme u pogledu investicionih troškova, dok sistemi sačinjeni od drenažnih bunara predstavljaju najskuplju varijantu u pogledu troškova funkcionisanja sistema, što se najviše odnosi na stopu potrošnje energije za rad pumpi, a zatim i na troškove održavanja, u pogledu periodičnog menjanja pumpi i regeneracije bunara, što nije slučaj kod vodonepropusnih ekrana.

- kriterijumi uticaja na životnu sredinu:

- **opadanje nivoa podzemnih voda** koje se odnosi na efekte i uticaje implementiranog rešenja na površinske i podzemne vode i na druge parametre životne sredine. Usled sniženja nivoa podzemnih voda prilikom rada sistema odbrane od podzemnih voda, javljaju se štetni uticaji na vodotoke, okolne hidrogeološke pojave, vodozahvatne objekte i zemljište. Tako, korišćenjem bunara, u kratkom periodu dolazi do stvaranja depresije i do „isušivanja” pojedinih delova terena, a upotrebom vodonepropusnih ekrana stvara se veštačka barijera prema podzemnim vodama.
- **kvalitet i količina iscrpljenih voda** koji se odnose na probleme povezane sa uticajem rudničkih voda na životnu sredinu, zatim, odnos količina isprpljenih voda po varijantama rešenja sistema odbrane od podzemnih voda korišćenjem bunara, kao i količine podzemnih voda i sprečavanje filtracije u ležište korišćenjem vodonepropusnog ekrana. Na slici III-75 prikazana je veličina isticanja podzemnih voda iz kosine radnih etaža po svim varijantama.
- **štednja energije** koja predstavlja niz mera koje se preduzimaju u cilju smanjenja potrošnje električne energije, a koje pritom ne narušavaju uslove rada sistema odbrane od podzemnih voda. Efikasna upotreba energije vodi ka energetske bezbednosti, čime se poštuju principi ekologije. U ovom

slučaju upotreba bunarskih pumpi dovodi do velike potrošnje energije, dok se korišćenjem vodonepropusnih ekrana rečena potrošnja svodi na minimum.

Ostvarivanje najpovoljnijeg efekta sistema odbrane od podzemnih voda podrazumeva razmatranje svih faktora: tehničkih, ekonomskih i ekoloških faktora. Valja napomenuti da je razumljivo kako sve analizirane varijante ne mogu biti primenjene u svim uslovima.

6.2. Postupak ocenjivanja kriterijuma, podkriterijuma i alternativa

Cilj proračuna prema metodi fazi analitičko hijerarhijskog procesa je određivanje optimalne alternative sistema odbrane od podzemnih voda na primeru površinskog kopa „Buvač”.

Prema drugom opisanom koraku u poglavlju II-3.7.4, prikazano je ocenjivanje kriterijuma, podkriterijuma i alternativa definisanih na primeru sistema odbrane površinskog kopa „Buvač”. Ocenjivanje je vršeno poređenjem parova elemenata u matricama korišćenjem lingvističkih varijabli i njenih numeričkih vrednosti prema pomenutim FAHP skalama vrednovanja (poglavlje II-3.5.3), pa su tako elementi međusobno definisani kao: „istog značaja”, „umereno važniji”, „strogo važniji”, „vrlo strogo važniji”, „dokazano važniji” i „ekstremno važniji”. Na osnovu toga, prikazana je matrica kriterijuma “A”, gde je određena važnost kriterijuma (teničkog - „T”, ekonomskog - „E” i ekološkog - „Ž”) u odnosu na cilj:

$$A = \begin{bmatrix} & T & E & Ž \\ T & 1, 1, 1 & \frac{2}{3}, 1, 2 & \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2} \\ E & \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2} & 1, 1, 1 & 1, \frac{3}{2}, 2 \\ Ž & \frac{2}{3}, 1, 2 & \frac{1}{2}, \frac{2}{3}, 1 & 1, 1, 1 \end{bmatrix}$$

Posle toga, izvršeno je ocenjivanje podkriterijuma, a pritom je utvrđen relativan značaj svih podkriterijuma u zavisnosti od svakog kriterijuma. Matrice procene su sledeće:

- za tehničke podkriterijume matrica „ A_T “

$$A_T = \begin{bmatrix} & T_1 & T_2 & T_3 & T_4 & T_5 \\ T_1 & 1,1,1 & \frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1 & 3,5,7 & 5,7,9 & 1,3,5 \\ T_2 & 1,3,5 & 1,1,1 & 3,4,5 & 5,7,9 & 5,6,7 \\ T_3 & \frac{1}{7}, \frac{1}{5}, \frac{1}{3} & \frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3} & 1,1,1 & 1,2,3 & 1,3,5 \\ T_4 & \frac{1}{9}, \frac{1}{7}, \frac{1}{5} & \frac{1}{9}, \frac{1}{7}, \frac{1}{5} & \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1 & 1,1,1 & 1,1,1 \\ T_5 & \frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1 & \frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1 & \frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1 & 1,1,1 & 1,1,1 \end{bmatrix}$$

sa elementima koji označavaju:

- T_1 : vreme,
- T_2 : prilagođenost hidrogeološkim uslovima,
- T_3 : efikasnost,
- T_4 : fleksibilnost i
- T_5 : pouzdanost;

- za ekonomske podkriterijume matrica „ A_E “

$$A_E = \begin{bmatrix} & E_1 & E_2 & E_3 \\ E_1 & 1,1,1 & \frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1 & \frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3} \\ E_2 & 1,3,5 & 1,1,1 & \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1 \\ E_3 & 3,4,5 & 1,2,3 & 1,1,1 \end{bmatrix}$$

sa elementima koji označavaju:

- E_1 : investicione troškove,
- E_2 : troškove funkcionisanja sistema i

- E_3 : troškove održavanja;

- za ekološke podkriterijume matrica „ $A_{\check{z}}$ “

$$A_{\check{z}} = \begin{bmatrix} & \check{z}_1 & \check{z}_2 & \check{z}_3 \\ \check{z}_1 & 1,1,1 & \frac{3}{2},2,\frac{5}{2} & \frac{5}{2},3,\frac{7}{2} \\ \check{z}_2 & \frac{2}{5},\frac{1}{2},\frac{2}{3} & 1,1,1 & \frac{2}{3},1,\frac{3}{2} \\ \check{z}_3 & \frac{2}{7},\frac{1}{3},\frac{2}{5} & \frac{2}{3},1,\frac{3}{2} & 1,1,1 \end{bmatrix}$$

sa elementima koji označavaju:

- $\check{z}_1$: opadanje nivoa podzemnih voda,
- $\check{z}_2$: kvalitet i količina dreniranih voda i
- $\check{z}_3$: štednju električne energije.

U sledećem koraku izvršeno je ocenjivanje alternativa, i to poređenjem parova od tri alternative u odnosu na svaki podkriterijum, koji su prikazani na slici III-76. Na taj način napravljeno je ukupno 11/ matrica „ Y “ sledeće forme:

$$Y_{T_1} = \begin{bmatrix} T_1 & A_1 & A_2 & A_3 \\ A_1 & 1,1,1 & 3,4,5 & 3,5,7 \\ A_2 & \frac{1}{5},\frac{1}{4},\frac{1}{3} & 1,1,1 & 1,2,3 \\ A_3 & \frac{1}{7},\frac{1}{5},\frac{1}{3} & \frac{1}{3},\frac{1}{2},1 & 1,1,1 \end{bmatrix}$$

$$Y_{T_2} = \begin{bmatrix} T_2 & A_1 & A_2 & A_3 \\ A_1 & 1,1,1 & \frac{1}{5},\frac{1}{4},\frac{1}{3} & \frac{1}{5},\frac{1}{3},1 \\ A_2 & 3,4,5 & 1,1,1 & \frac{1}{3},\frac{1}{2},1 \\ A_3 & 1,3,5 & 1,2,3 & 1,1,1 \end{bmatrix}$$

$$Y_{T_3} = \left[\begin{array}{c|ccc} T_3 & A_1 & A_2 & A_3 \\ \hline A_1 & 1,1,1 & \frac{1}{9}, \frac{1}{7}, \frac{1}{5} & \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1 \\ A_2 & 5,7,9 & 1,1,1 & \frac{1}{7}, \frac{1}{5}, \frac{1}{3} \\ A_3 & 1,2,3 & 3,5,7 & 1,1,1 \end{array} \right]$$

$$Y_{T_4} = \left[\begin{array}{c|ccc} T_4 & A_1 & A_2 & A_3 \\ \hline A_1 & 1,1,1 & \frac{1}{9}, \frac{1}{7}, \frac{1}{5} & 7,8,9 \\ A_2 & 5,7,9 & 1,1,1 & \frac{1}{7}, \frac{1}{5}, \frac{1}{3} \\ A_3 & \frac{1}{9}, \frac{1}{8}, \frac{1}{7} & 3,5,7 & 1,1,1 \end{array} \right]$$

$$Y_{T_5} = \left[\begin{array}{c|ccc} T_5 & A_1 & A_2 & A_3 \\ \hline A_1 & 1,1,1 & \frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3} & \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1 \\ A_2 & 3,4,5 & 1,1,1 & \frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1 \\ A_3 & 1,2,3 & 1,3,5 & 1,1,1 \end{array} \right]$$

$$Y_{E_1} = \left[\begin{array}{c|ccc} E_1 & A_1 & A_2 & A_3 \\ \hline A_1 & 1,1,1 & \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{7} & \frac{1}{9}, \frac{1}{7}, \frac{1}{5} \\ A_2 & 7,9,9 & 1,1,1 & \frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1 \\ A_3 & 5,7,9 & 1,3,5 & 1,1,1 \end{array} \right]$$

$$Y_{E_2} = \left[\begin{array}{c|ccc} E_2 & A_1 & A_2 & A_3 \\ \hline A_1 & 1,1,1 & \frac{1}{9}, \frac{1}{8}, \frac{1}{7} & \frac{1}{7}, \frac{1}{5}, \frac{1}{3} \\ A_2 & 7,8,9 & 1,1,1 & \frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1 \\ A_3 & 3,5,7 & 1,3,5 & 1,1,1 \end{array} \right]$$

$$Y_{E_3} = \begin{bmatrix} E_3 & A_1 & A_2 & A_3 \\ A_1 & 1,1,1 & \frac{1}{9}, \frac{1}{7}, \frac{1}{5} & \frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3} \\ A_2 & 5,7,9 & 1,1,1 & \frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1 \\ A_3 & 3,4,5 & 1,3,5 & 1,1,1 \end{bmatrix}$$

$$Y_{Z_1} = \begin{bmatrix} \check{Z}_1 & A_1 & A_2 & A_3 \\ A_1 & 1,1,1 & 3,4,5 & 7,9,9 \\ A_2 & \frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3} & 1,1,1 & 3,5,7 \\ A_3 & \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{7} & \frac{1}{7}, \frac{1}{5}, \frac{1}{3} & 1,1,1 \end{bmatrix}$$

$$Y_{Z_2} = \begin{bmatrix} \check{Z}_2 & A_1 & A_2 & A_3 \\ A_1 & 1,1,1 & 1,2,3 & 7,9,9 \\ A_2 & \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1 & 1,1,1 & 5,7,9 \\ A_3 & \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{7} & \frac{1}{9}, \frac{1}{7}, \frac{1}{5} & 1,1,1 \end{bmatrix}$$

$$Y_{Z_3} = \begin{bmatrix} \check{Z}_3 & A_1 & A_2 & A_3 \\ A_1 & 1,1,1 & 1,3,5 & 7,9,9 \\ A_2 & \frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1 & 1,1,1 & 5,6,7 \\ A_3 & \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{7} & \frac{1}{7}, \frac{1}{6}, \frac{1}{5} & 1,1,1 \end{bmatrix}$$

6.3. Postupak određivanja vektora težinskih prioriteta

Kako je naglašeno u poglavlju II-3.7.4, određivanje „težina” u matrici izvršeno je pomoću tzv. fazi stepene analize (Chang, 1996) i prikazanih obrazaca navedenih redom za kriterijume, podkriterijume i alternative. Na osnovu toga, dalje su proračunati i prikazani vektori težinskih prioriteta.

Prema matrici kriterijuma "A" redom za tehničke kriterijume (ω_1), za ekonomske kriterijume (ω_2) i za ekološke kriterijume (ω_3) vektori težinskih prioriteta iznose:

$$\omega_1 = \frac{[1,1,1] + \left[\frac{2}{3}, 1, 2\right] + \left[\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}\right]}{[1,1,1] + \left[\frac{2}{3}, 1, 2\right] + \left[\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}\right] + \left[\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}\right] + [1,1,1] + \left[1, \frac{3}{2}, 2\right] + \left[\frac{2}{3}, 1, 2\right] + \left[\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, 1\right] + [1,1,1]}$$

$$\omega_1 = (0.166, 0.328, 0.660)$$

$$\omega_2 = \frac{\left[\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}\right] + [1,1,1] + \left[1, \frac{3}{2}, 2\right]}{[1,1,1] + \left[\frac{2}{3}, 1, 2\right] + \left[\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}\right] + \left[\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}\right] + [1,1,1] + \left[1, \frac{3}{2}, 2\right] + \left[\frac{2}{3}, 1, 2\right] + \left[\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, 1\right] + [1,1,1]}$$

$$\omega_2 = (0.192, 0.382, 0.660)$$

$$\omega_3 = \frac{\left[\frac{2}{3}, 1, 2\right] + \left[\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, 1\right] + [1,1,1]}{[1,1,1] + \left[\frac{2}{3}, 1, 2\right] + \left[\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}\right] + \left[\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}\right] + [1,1,1] + \left[1, \frac{3}{2}, 2\right] + \left[\frac{2}{3}, 1, 2\right] + \left[\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, 1\right] + [1,1,1]}$$

$$\omega_3 = (0.166, 0.290, 0.587)$$

Konačne težine kriterijuma su sledeće:

$$\omega = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.166, 0.328, 0.660) \\ (0.192, 0.382, 0.660) \\ (0.166, 0.290, 0.587) \end{bmatrix}$$

Sledeći korak je određivanje vektora težinskih prioriteta (ω) podkriterijuma u odnosu na posmatrani kriterijum. Redom su prikazane težine podkriterijuma za:

- T₁: vreme

$$\omega_{T_1} = \frac{[1,1,1] + \left[\frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1\right] + [3,5,7] + [5,7,9] + [1,3,5]}{[1,1,1] + \dots + [1,3,5] + \dots + \left[\frac{1}{7}, \frac{1}{5}, \frac{1}{3}\right] + \dots + \left[\frac{1}{9}, \frac{1}{7}, \frac{1}{5}\right] + \dots + \left[\frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1\right] + \dots}$$

$$\omega_{T_1} = (0.152, 0.331, 0.684)$$

- T₂ : prilagođenost hidrogeološkim uslovima

$$\omega_{T_2} = \frac{[1,3,5] + [1,1,1] + [3,4,5] + [5,7,9] + [5,6,7]}{[1,1,1] + \dots + [1,3,5] + \dots + \left[\frac{1}{7}, \frac{1}{5}, \frac{1}{3}\right] + \dots + \left[\frac{1}{9}, \frac{1}{7}, \frac{1}{5}\right] + \dots + \left[\frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1\right] + \dots}$$

$$\omega_{T_2} = (0.223, 0.425, 0.803)$$

- T₃: efikasnost

$$\omega_{T_3} = \frac{\left[\frac{1}{7}, \frac{1}{5}, \frac{1}{3}\right] + \left[\frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3}\right] + [1,1,1] + [1,2,3] + [1,3,5]}{[1,1,1] + \dots + [1,3,5] + \dots + \left[\frac{1}{7}, \frac{1}{5}, \frac{1}{3}\right] + \dots + \left[\frac{1}{9}, \frac{1}{7}, \frac{1}{5}\right] + \dots + \left[\frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1\right] + \dots}$$

$$\omega_{T_3} = (0.050, 0.131, 0.287)$$

- T₄: fleksibilnost

$$\omega_{T_4} = \frac{\left[\frac{1}{9}, \frac{1}{7}, \frac{1}{5}\right] + \left[\frac{1}{9}, \frac{1}{7}, \frac{1}{5}\right] + \left[\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1\right] + [1,1,1] + [1,1,1]}{[1,1,1] + \dots + [1,3,5] + \dots + \left[\frac{1}{7}, \frac{1}{5}, \frac{1}{3}\right] + \dots + \left[\frac{1}{9}, \frac{1}{7}, \frac{1}{5}\right] + \dots + \left[\frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1\right] + \dots}$$

$$\omega_{T_4} = (0.038, 0.056, 0.101)$$

- T₅: pouzdanost

$$\omega_{T_5} = \frac{\left[\frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1\right] + \left[\frac{1}{7}, \frac{1}{6}, \frac{1}{5}\right] + \left[\frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1\right] + [1, 1, 1] + [1, 1, 1]}{[1, 1, 1] + \dots + [1, 3, 5] + \dots + \left[\frac{1}{7}, \frac{1}{5}, \frac{1}{3}\right] + \dots + \left[\frac{1}{9}, \frac{1}{7}, \frac{1}{5}\right] + \dots + \left[\frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1\right] + \dots}$$

$$\omega_{T_5} = (0.038, 0.057, 0.125)$$

- E₁: investicione troškove

$$\omega_{E_1} = \frac{[1, 1, 1] + \left[\frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1\right] + \left[\frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3}\right]}{[1, 1, 1] + \left[\frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1\right] + \left[\frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3}\right] + [1, 3, 5] + [1, 1, 1] + \left[\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1\right] + [3, 4, 5] + [1, 2, 3] + [1, 1, 1]}$$

$$\omega_{E_1} = (0.076, 0.121, 0.267)$$

- E₂: troškove funkcionisanja sistema

$$\omega_{E_2} = \frac{[1, 3, 5] + [1, 1, 1] + \left[\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1\right]}{[1, 1, 1] + \left[\frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1\right] + \left[\frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3}\right] + [1, 3, 5] + [1, 1, 1] + \left[\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1\right] + [3, 4, 5] + [1, 2, 3] + [1, 1, 1]}$$

$$\omega_{E_2} = (0.127, 0.344, 0.802)$$

- E₃ : troškove održavanja sistema

$$\omega_{E_3} = \frac{[3, 4, 5] + [1, 2, 3] + [1, 1, 1]}{[1, 1, 1] + \left[\frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1\right] + \left[\frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3}\right] + [1, 3, 5] + [1, 1, 1] + \left[\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1\right] + [3, 4, 5] + [1, 2, 3] + [1, 1, 1]}$$

$$\omega_{E_3} = (0.273, 0.535, 1.031)$$

- $\check{Z}_1$: opadanje nivoa podzemnih voda

$$\omega_{\check{Z}_1} = \frac{[1,1,1] + \left[\frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2}\right] + \left[\frac{5}{2}, 3, \frac{7}{2}\right]}{[1,1,1] + \left[\frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2}\right] + \left[\frac{5}{2}, 3, \frac{7}{2}\right] + \left[\frac{2}{5}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3}\right] + [1,1,1] + \left[\frac{2}{3}, 1, \frac{3}{2}\right] + \left[\frac{2}{7}, \frac{1}{3}, \frac{2}{5}\right] + \left[\frac{2}{3}, 1, \frac{3}{2}\right] + [1,1,1]}$$

$$\omega_{\check{Z}_1} = (0.383, 0.554, 0.776)$$

- $\check{Z}_2$: kvalitet i količinu dreniranih voda

$$\omega_{\check{Z}_2} = \frac{\left[\frac{2}{5}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3}\right] + [1,1,1] + \left[\frac{2}{3}, 1, \frac{3}{2}\right]}{[1,1,1] + \left[\frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2}\right] + \left[\frac{5}{2}, 3, \frac{7}{2}\right] + \left[\frac{2}{5}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3}\right] + [1,1,1] + \left[\frac{2}{3}, 1, \frac{3}{2}\right] + \left[\frac{2}{7}, \frac{1}{3}, \frac{2}{5}\right] + \left[\frac{2}{3}, 1, \frac{3}{2}\right] + [1,1,1]}$$

$$\omega_{\check{Z}_2} = (0.158, 0.231, 0.351)$$

- $\check{Z}_3$: štednju električne energije

$$\omega_{\check{Z}_3} = \frac{\left[\frac{2}{7}, \frac{1}{3}, \frac{2}{5}\right] + \left[\frac{2}{3}, 1, \frac{3}{2}\right] + [1,1,1]}{[1,1,1] + \left[\frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2}\right] + \left[\frac{5}{2}, 3, \frac{7}{2}\right] + \left[\frac{2}{5}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3}\right] + [1,1,1] + \left[\frac{2}{3}, 1, \frac{3}{2}\right] + \left[\frac{2}{7}, \frac{1}{3}, \frac{2}{5}\right] + \left[\frac{2}{3}, 1, \frac{3}{2}\right] + [1,1,1]}$$

$$\omega_{\check{Z}_3} = (0.149, 0.215, 0.322)$$

Sumirano, konačne težine tehničkih (ω_T), ekonomskih (ω_E) i ekoloških podkriterijuma ($\omega_{\check{Z}}$) su sledeće:

$$\omega_T = \begin{bmatrix} \omega_{T_1} \\ \omega_{T_2} \\ \omega_{T_3} \\ \omega_{T_4} \\ \omega_{T_5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.152, 0.331, 0.684) \\ (0.223, 0.425, 0.803) \\ (0.050, 0.131, 0.287) \\ (0.038, 0.056, 0.101) \\ (0.038, 0.057, 0.125) \end{bmatrix}$$

$$\omega_E = \begin{bmatrix} \omega_{E_1} \\ \omega_{E_2} \\ \omega_{E_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.166, 0.328, 0.660) \\ (0.192, 0.382, 0.660) \\ (0.166, 0.290, 0.587) \end{bmatrix}$$

$$\omega_Z = \begin{bmatrix} \omega_{Z_1} \\ \omega_{Z_2} \\ \omega_{Z_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.383, 0.554, 0.776) \\ (0.158, 0.231, 0.351) \\ (0.149, 0.215, 0.322) \end{bmatrix}$$

Dalje, fazi stepenom analizom proračunate su i težine (x) alternativa svih “Y” matrica (u kojima je izvršeno ocenjivanje alternativa, poređenjem parova od ukupno tri alternative u odnosu na svaki podkriterijum), poštujući sve podkriterijume redom:

$$x_{T_1} = \begin{bmatrix} x_{A_1} \\ x_{A_2} \\ x_{A_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.356, 0.669, 1.218) \\ (0.112, 0.217, 0.406) \\ (0.075, 0.114, 0.218) \end{bmatrix}$$

$$x_{T_2} = \begin{bmatrix} x_{A_1} \\ x_{A_2} \\ x_{A_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.076, 0.121, 0.267) \\ (0.236, 0.420, 0.802) \\ (0.164, 0.459, 1.031) \end{bmatrix}$$

$$x_{T_3} = \begin{bmatrix} x_{A_1} \\ x_{A_2} \\ x_{A_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.061, 0.092, 0.175) \\ (0.261, 0.460, 0.821) \\ (0.212, 0.448, 0.874) \end{bmatrix}$$

$$x_{T_4} = \begin{bmatrix} x_{A_1} \\ x_{A_2} \\ x_{A_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.283, 0.390, 0.556) \\ (0.214, 0.349, 0.563) \\ (0.143, 0.261, 0.443) \end{bmatrix}$$

$$x_{T_5} = \begin{bmatrix} x_{A_1} \\ x_{A_2} \\ x_{A_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.083, 0.134, 0.267) \\ (0.229, 0.407, 0.802) \\ (0.164, 0.459, 1.031) \end{bmatrix}$$

$$x_{E_1} = \begin{bmatrix} x_{A_1} \\ x_{A_2} \\ x_{A_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.045, 0.055, 0.082) \\ (0.300, 0.457, 0.670) \\ (0.256, 0.487, 0.914) \end{bmatrix}$$

$$x_{E_2} = \begin{bmatrix} x_{A_1} \\ x_{A_2} \\ x_{A_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.049, 0.067, 0.102) \\ (0.322, 0.475, 0.761) \\ (0.196, 0.458, 0.900) \end{bmatrix}$$

$$x_{E_3} = \begin{bmatrix} x_{A_1} \\ x_{A_2} \\ x_{A_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.056, 0.078, 0.122) \\ (0.263, 0.470, 0.879) \\ (0.212, 0.451, 0.879) \end{bmatrix}$$

$$x_{Z_1} = \begin{bmatrix} x_{A_1} \\ x_{A_2} \\ x_{A_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.444, 0.649, 0.912) \\ (0.169, 0.290, 0.506) \\ (0.050, 0.061, 0.089) \end{bmatrix}$$

$$x_{Z_2} = \begin{bmatrix} x_{A_1} \\ x_{A_2} \\ x_{A_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.355, 0.552, 0.785) \\ (0.250, 0.391, 0.665) \\ (0.048, 0.057, 0.081) \end{bmatrix}$$

$$x_{Z_3} = \begin{bmatrix} x_{A_1} \\ x_{A_2} \\ x_{A_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.355, 0.602, 0.912) \\ (0.245, 0.339, 0.547) \\ (0.049, 0.059, 0.081) \end{bmatrix}$$

6.4. Postupak primene principa agregacije

U ovom koraku izvršena je operacija množenja trougaonih fazi brojeva (poglavlje II-3.5), a vrši se tako što se pomnože iz prethodnih koraka dobijene težine kriterijuma sa težinama svojih podkriterijumima. Ovim proračunima dobijene su konačne vrednosti „težina“ podkriterijuma (ω'). Na taj način su postavljeni u jedinstveni nivo kriterijumi i podkriterijumi, u čemu se i ogleda princip agregacije: „nestanak“ jednog nivoa, kojim je ceo sistem uprošćen. Pomenuti proračun je nadalje prikazan:

$$\omega'_T = \omega_1 \otimes \omega_T = \begin{bmatrix} \omega_1 \otimes \omega_{T_1} \\ \omega_1 \otimes \omega_{T_2} \\ \omega_1 \otimes \omega_{T_3} \\ \omega_1 \otimes \omega_{T_4} \\ \omega_1 \otimes \omega_{T_5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.166, 0.328, 0.660) \otimes (0.152, 0.331, 0.684) \\ (0.166, 0.328, 0.660) \otimes (0.223, 0.425, 0.803) \\ (0.166, 0.328, 0.660) \otimes (0.050, 0.131, 0.287) \\ (0.166, 0.328, 0.660) \otimes (0.038, 0.056, 0.101) \\ (0.166, 0.328, 0.660) \otimes (0.038, 0.057, 0.125) \end{bmatrix}$$

$$\omega'_E = \omega_2 \otimes \omega_E = \begin{bmatrix} \omega_2 \otimes \omega_{E_1} \\ \omega_2 \otimes \omega_{E_2} \\ \omega_2 \otimes \omega_{E_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.192, 0.382, 0.660) \otimes (0.166, 0.328, 0.660) \\ (0.192, 0.382, 0.660) \otimes (0.192, 0.382, 0.660) \\ (0.192, 0.382, 0.660) \otimes (0.166, 0.290, 0.587) \end{bmatrix}$$

$$\omega'_Z = \omega_3 \otimes \omega_Z = \begin{bmatrix} \omega_3 \otimes \omega_{Z_1} \\ \omega_3 \otimes \omega_{Z_2} \\ \omega_3 \otimes \omega_{Z_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.166, 0.290, 0.587) \otimes (0.383, 0.554, 0.776) \\ (0.166, 0.290, 0.587) \otimes (0.158, 0.231, 0.351) \\ (0.166, 0.290, 0.587) \otimes (0.149, 0.215, 0.322) \end{bmatrix}$$

Konačne vrednosti težina podkriterijuma su redom predstavljene :

$$\omega'_{T_1} = (0.025, 0.108, 0.451) = W_1$$

$$\omega'_{T_2} = (0.037, 0.139, 0.530) = W_2$$

$$\omega'_{T_3} = (0.008, 0.043, 0.190) = W_3$$

$$\omega'_{T_4} = (0.006, 0.018, 0.067) = W_4$$

$$\omega'_{T_5} = (0.006, 0.019, 0.082) = W_5$$

$$\omega'_{E_1} = (0.015, 0.046, 0.176) = W_6$$

$$\omega'_{E_2} = (0.024, 0.131, 0.529) = W_7$$

$$\omega'_{E_3} = (0.052, 0.204, 0.680) = W_8$$

$$\omega'_{Z_1} = (0.064, 0.161, 0.455) = W_9$$

$$\omega'_{Z_1} = (0.026, 0.067, 0.206) = W_{10}$$

$$\omega'_{Z_1} = (0.025, 0.063, 0.189) = W_{11}$$

6.5. Formiranje fazi matrice odluke i fazi matrice performansi

Fazi matrica odluke dobijena je na osnovu proračuna fazi stepene analize za alternative, prema koraku 3, opisanom u teorijskom delu (poglavlje II-3.7.4). Na taj način, matrica odluke je sledeća:

$$X = \begin{bmatrix} (0.356, 0.669, 1.218)(0.076, 0.121, 0.267)(0.061, 0.092, 0.175)(0.283, 0.390, 0.556) \\ (0.112, 0.217, 0.406)(0.236, 0.420, 0.802)(0.261, 0.460, 0.821)(0.214, 0.349, 0.563) \\ (0.075, 0.114, 0.218)(0.164, 0.459, 1.031)(0.212, 0.448, 0.874)(0.143, 0.261, 0.443) \\ (0.083, 0.134, 0.267)(0.045, 0.055, 0.082)(0.049, 0.067, 0.102)(0.056, 0.078, 0.122) \\ (0.229, 0.407, 0.802)(0.300, 0.457, 0.670)(0.322, 0.475, 0.761)(0.263, 0.470, 0.879) \\ (0.164, 0.459, 1.031)(0.256, 0.487, 0.914)(0.196, 0.458, 0.900)(0.212, 0.451, 0.879) \\ (0.444, 0.649, 0.912)(0.355, 0.552, 0.785)(0.355, 0.602, 0.912) \\ (0.169, 0.290, 0.506)(0.250, 0.391, 0.665)(0.245, 0.339, 0.547) \\ (0.050, 0.061, 0.089)(0.048, 0.057, 0.081)(0.049, 0.059, 0.081) \end{bmatrix}$$

Fazi matrica performansi predstavlja ukupni učinak svake alternative kroz sve podkriterijume, a izračunata je množenjem svih konačnih vrednosti vektora težinskih prioriteta podkriterijuma sa elementima matrice odluke:

$$Z = \begin{bmatrix} (0.009, 0.072, 0.0550)(0.003, 0.017, 0.141)(0.001, 0.004, 0.033)(0.002, 0.007, 0.037) \\ (0.003, 0.024, 0.183)(0.009, 0.059, 0.425)(0.002, 0.020, 0.156)(0.001, 0.006, 0.038) \\ (0.002, 0.012, 0.099)(0.006, 0.064, 0.546)(0.002, 0.019, 0.166)(0.001, 0.005, 0.030) \\ (0.001, 0.003, 0.022)(0.001, 0.003, 0.014)(0.001, 0.009, 0.054)(0.003, 0.016, 0.083) \\ (0.001, 0.008, 0.066)(0.004, 0.021, 0.118)(0.008, 0.062, 0.403)(0.014, 0.096, 0.598) \\ (0.001, 0.009, 0.085)(0.004, 0.022, 0.161)(0.005, 0.060, 0.476)(0.011, 0.092, 0.598) \\ (0.028, 0.104, 0.415)(0.009, 0.037, 0.162)(0.009, 0.038, 0.172) \\ (0.011, 0.047, 0.230)(0.007, 0.026, 0.137)(0.006, 0.021, 0.103) \\ (0.003, 0.010, 0.041)(0.001, 0.004, 0.017)(0.001, 0.004, 0.015) \end{bmatrix}$$

6.6. Određivanje konačnih vrednosti ocena alternativa

Sumiranjem elemenata iz redova fazi matrice performansi proračunate su konačne ocene za sve tri alternative u vidu trougaonog fazi broja:

$$F = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.066, 0.309, 0.684) \\ (0.066, 0.390, 2.457) \\ (0.037, 0.301, 2.233) \end{bmatrix}$$

6.7. Prikaz defazifikacije i rangiranja alternativa

Defazifikacijom trougaonih fazi brojeva, a prema postupku opisanom u poglavlju II-3.4., dobijene su „težine“ alternativa u vidu „normalnog“ broja (tabela III-17). Najbolja ocena predstavljena je najvišom vrednosti „težine alternative“. Optimalnu varijantu sistema odbrane od podzemnih voda sa težinom od 0.386 čini alternativa broj 2. Sistem odbrane od podzemnih voda prema varijanti 2 čine: vodonepropusni ekran na severu duž izmeštenog korita Gomjenice, dužine 1857 m i dubine do podine aluvijalnih naslaga, a na modelu zadat počev od 1.1.2016. godine. Pored vodonepropusnog ekrana, projektovanog na severu prema varijanti 2, sistem odbrane od podzemnih voda u aluvijalnoj izdani čini još: osam bunara (Eb-1 – Eb-8) na zapadu, drenažni usek DU-4 i vodonepropusni ekran na jugoistoku, koji su zadati od 2013. godine (slika III-41). Oni čine jedine objekte sistema odbrane kopa do 2016. god., kada uporedo startuje i

vodonepropusni ekran na severu, projektovan prema varijanti 2 hidrodinamičkim modeliranjem. Na drugom mestu je kombinacija drenažnih bunara i vodonepropusnog ekrana (alternativa 3), dok najnepovoljniju varijantu čini sistem sačinjen od drenažnih bunara (alternativa 1).

Tabela III-17: Defazifikovani fazi brojevi i rangiranje alternativa

Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
0.273	0.386	0.341

6.8. Postupak proračuna ukupnog integrala korišćenjem optimizacionog indeksa

Kako je već opisano (poglavlje II-3.7.4), veća vrednost optimizacionog indeksa ukazuje na veći stepen optimizma, a za proračune su usvojene sledeće vrednosti: „0“ za pesimistički stav eksperta, „1“ za optimistički stav eksperta, a vrednost „0.5“ se korišćena je kao umerenost u stavu eksperta. Stoga je u tabeli III-18 prikazano rangiranje alternativa.

Tabela III-18: Rangiranje alternativa korišćenjem optimizacionog indeksa

Optimizacioni indeks	$\lambda=0$	$\lambda=0.5$	$\lambda=1$	Finalno rangiranje
Alternativa 1	0.321	0.277	0.270	3
Alternativa 2	0.390	0.387	0.386	1
Alternativa 3	0.289	0.336	0.344	2

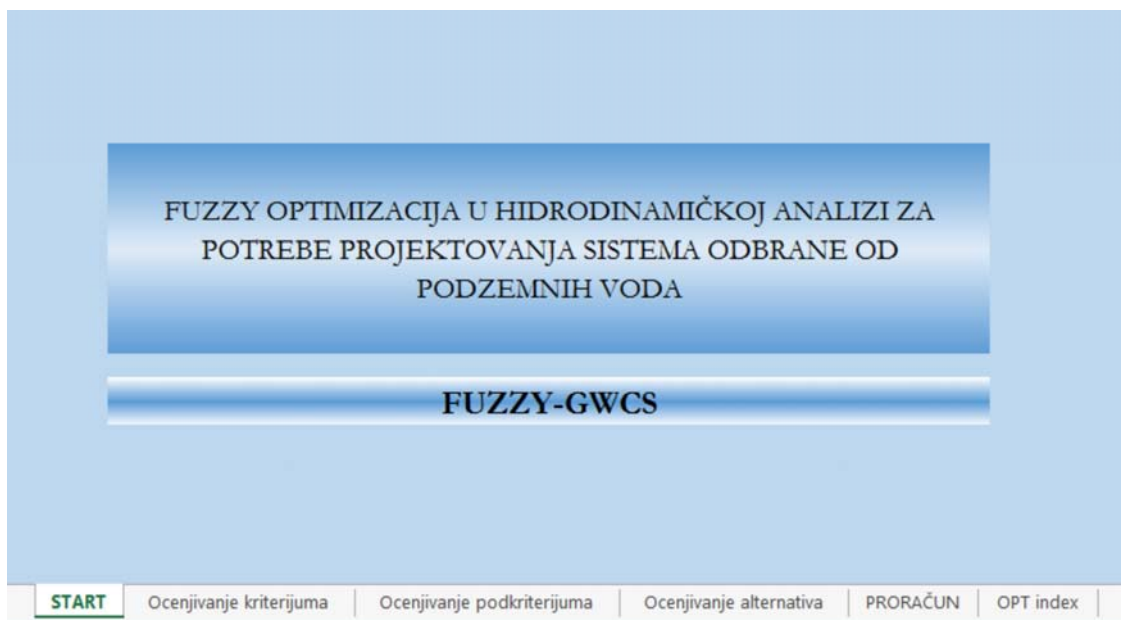
6.9. Prikaz određivanja optimalnog sistema odbrane od podzemnih voda površinskog kopa „Buvač” korišćenjem „Fuzzy-GWCS” aplikacije

Fazi optimizacija, metodom fazi analitičko hijerarhijskog procesa (FAHP), i određivanje optimalne alternative sistema odbrane od podzemnih voda površinskog

kopa „Buvač” urađeni su u aplikaciji „Fuzzy-GWCS”, specijalno napravljenoj za te namene. Na slikama od III-77 do III-84 predstavljeni su „prozori” pomenute aplikacije.

Na slici III-77 predstavljen je osnovni „prozor” aplikacije „Fuzzy-GWCS”, gde se u donjem delu mogu videti i ostali prozori:

- „ocenjivanje kriterijuma”,
- „ocenjivanje podkriterijuma”,
- „ocenjivanje alternativa”,
- „proračuni” i „OPTindex”.



Slika III-77: Prozor „Start“ aplikacije „Fuzzy-GWCS“

Ulazne elemente u program „Fuzzy-GWCS” predstavljaju numeričke vrednosti lingvističkih varijabli, koje su definisane FAHP skalom. Na slici III-78 prikazane su matrice kriterijuma u bojama, i to: za tehničke kriterijume - žuta boja, za ekonomske kriterijume - narandžasta boja i za ekološke kriterijume zelena boja, dok se u desnom delu, obleženog crvenom bojom, nalaze proračunate vrednosti vektora težinskih prioriteta tih kriterijuma.

OCENJIVANJE KRITERIJUMA

	Tehnološki kriterijum (T)	Ekonomski kriterijum (E)	Ekološki kriterijum (Ž)	Suma matrice	Težine
T	1 1 1	0.66 1 2	0.5 1 1.5	2.16 3 4.5	0.366 0.328 0.660
E	0.5 1 1.5	1 1 1	1 1.5 2	2.5 3.5 4.5	0.192 0.382 0.660
Ž	0.66 1 2	0.5 0.66 1	1 1 1	2.16 2.66 4	0.366 0.290 0.387
suma				6.82 9.16 13	

START **Ocenjivanje kriterijuma** Ocenjivanje podkriterijuma Ocenjivanje alternativa PRORAČUN OPT index +

Slika III-78: Prozor „Ocenjivanje kriterijuma” aplikacije „Fuzzy-GWCS“

Na slikama od III-79 do III-82 prikazane su matrice podkriterijuma, matrice alternativa, takođe, u crvenoj boji, kao i vrednosti proračunatih vektora težinskih prioriteta podkriterijuma u odnosu na posmatrani kriterijum i težine alternativa, poštujući sve navedene podkriterijume.

OCENJIVANJE PODKRITERIJUMA

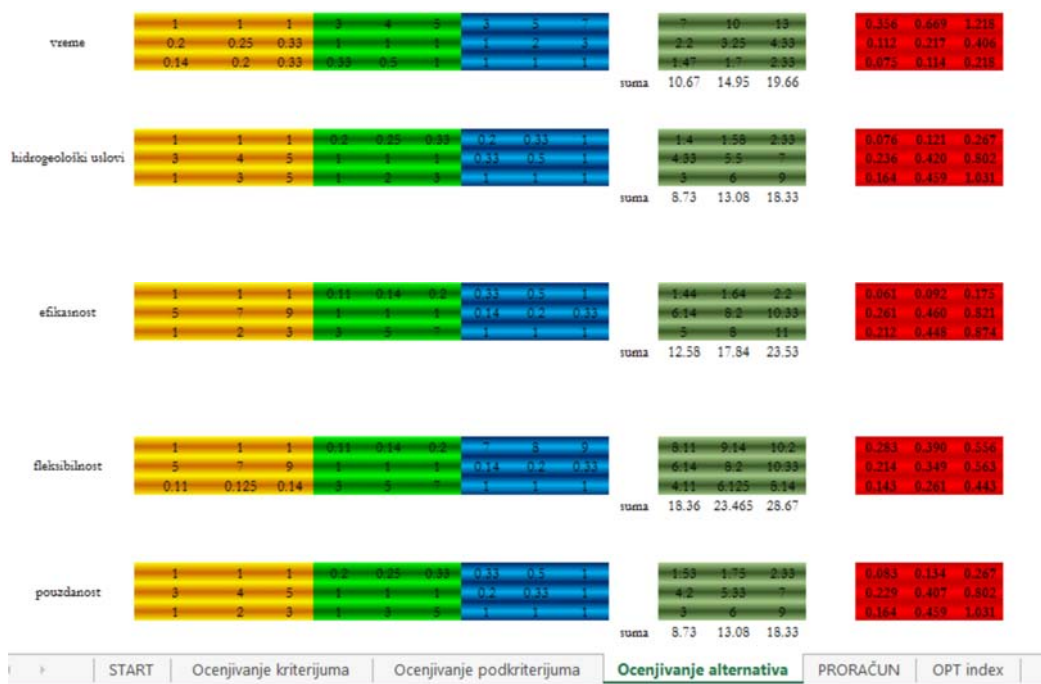
	T1	T2	T3	T4	T5	Suma matrice	Težine
T1	1 1 1	0.2 0.33 1	3 5 7	5 7 9	1 3 5	10.2 16.33 23	0.152 0.331 0.684
T2	1 3 5	1 1 1	3 4 5	5 7 9	5 6 7	15 21 27	0.223 0.425 0.803
T3	0.14 0.2 0.33	0.2 0.25 0.33	1 1 1	1 2 3	1 3 5	3.34 6.45 9.66	0.010 0.131 0.287
T4	0.11 0.14 0.2	0.11 0.14 0.2	0.33 0.5 1	1 1 1	1 1 1	2.55 2.78 3.4	0.038 0.056 0.103
T5	0.2 0.33 1	0.14 0.166 0.2	0.2 0.33 1	1 1 1	1 1 1	2.54 2.826 4.2	0.038 0.057 0.123
suma						33.63 49.386 67.26	

	E1	E2	E3	Suma matrice	Težine
E1	1 1 1	0.2 0.33 1	0.2 0.25 0.33	1.4 1.58 2.33	0.076 0.121 0.267
E2	1 3 5	1 1 1	0.33 0.5 1	2.33 4.5 7	0.127 0.344 0.802
E3	3 4 5	1 2 3	1 1 1	5 7 9	0.279 0.320 0.641
suma				8.73 13.08 18.33	

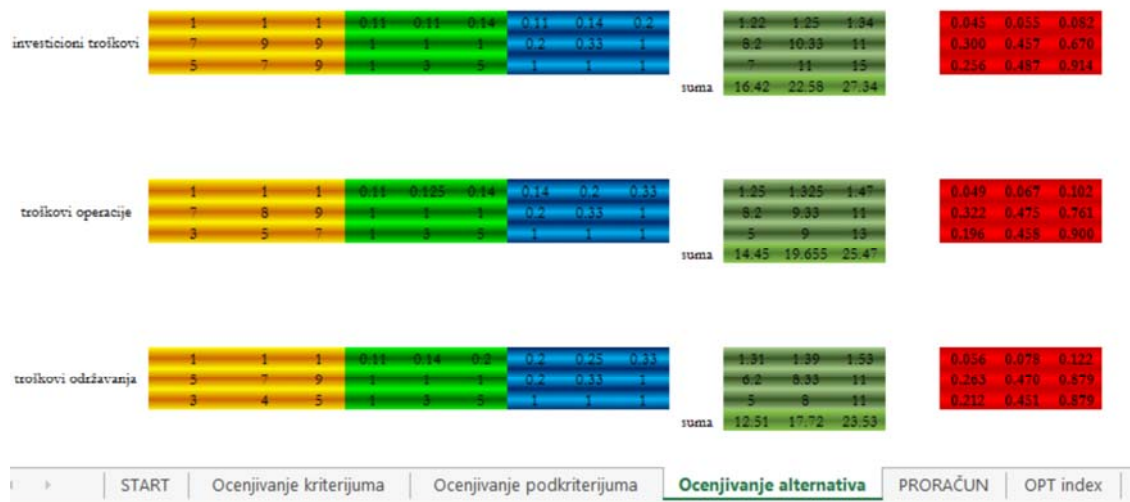
	Z1	Z2	Z3	Suma matrice	Težine
Z1	1 1 1	1.5 2 2.5	2.5 3 3.5	5 6 7	0.383 0.334 0.776
Z2	0.4 0.5 0.667	1 1 1	0.667 1 1.5	2.067 2.5 3.1667	0.158 0.231 0.351
Z3	0.286 0.333 0.4	0.667 1 1.5	1 1 1	1.9527 2.333 2.9	0.149 0.215 0.323
suma				9.02 10.93 13.07	

START Ocenjivanje kriterijuma **Ocenjivanje podkriterijuma** Ocenjivanje alternativa PRORAČUN OPT index +

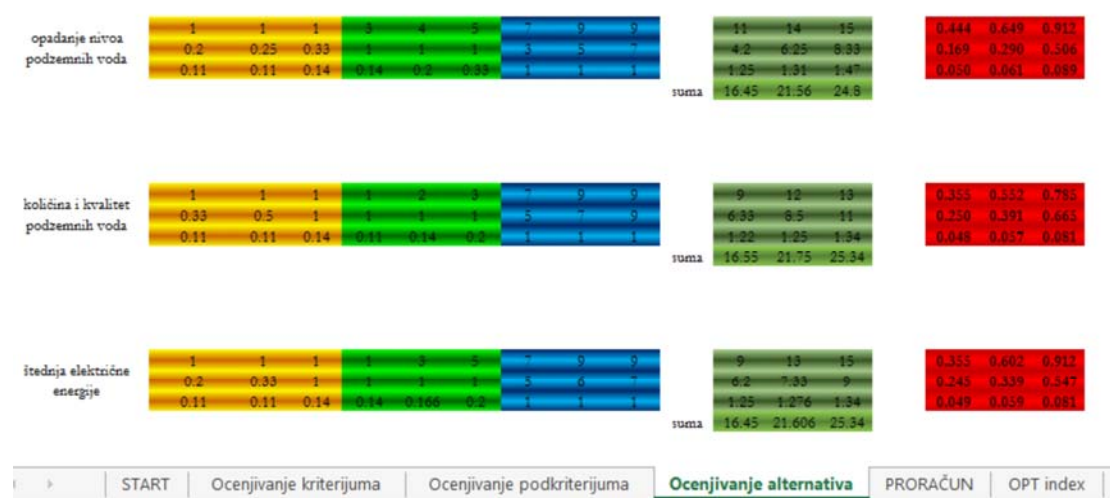
Slika III-79: Prozor „Ocenjivanje podkriterijuma“ aplikacije „Fuzzy-GWCS“



Slika III-80: Prozor „Ocenjivanje alternativa“ aplikacije „Fuzzy-GWCS“ za tehničke podkriterijume



Slika III-81: Prozor „Ocenjivanje alternativa“ aplikacije „Fuzzy-GWCS“ za ekonomske podkriterijume



Slika III-82: Prozor „Ocenjivanje alternativa“ aplikacije „Fuzzy-GWCS“ za ekološke podkriterijume

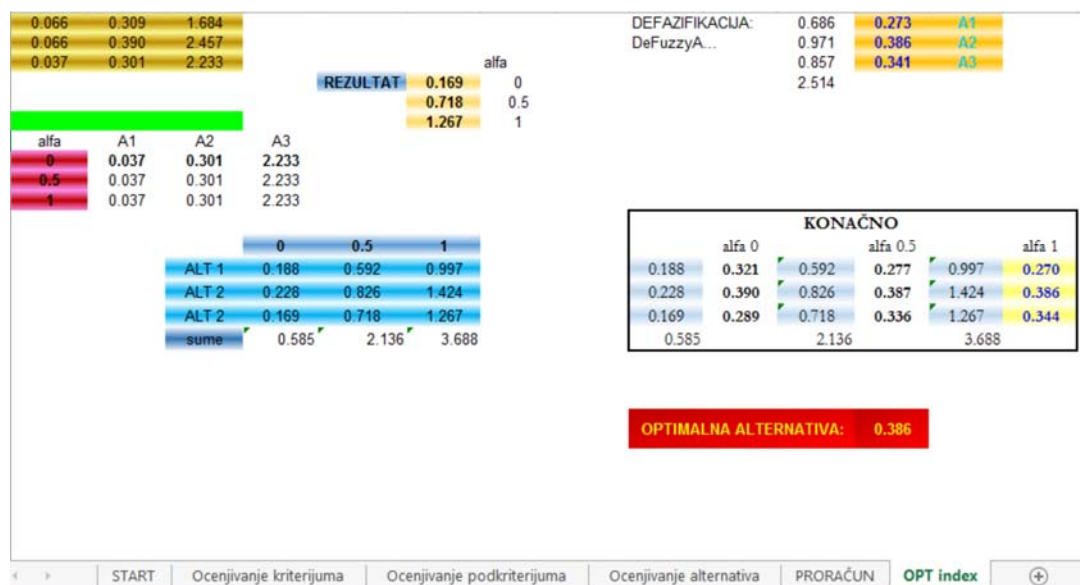
Na slici III-83 prikazani su primena principa agregacije i proračun težina kriterijuma sa težinama svojih podkriterijumima i konačne vrednosti „težina“ podkriterijuma. Pored toga, računskim operacijama između „prozora“ dobija se matrica performansi prikazana žuto-zeleno-ljubičastom bojom. Naposljetku, u desnom uglu prikazane su proračunate konačne vrednosti sve tri alternative u vidu trougaonog fazi broja.

0.025	0.108	0.451	w1	0.009	0.072	0.550	0.066	0.309	1.684	F1
0.037	0.139	0.530	w2	0.003	0.024	0.183	0.066	0.390	2.457	F2
0.008	0.043	0.190	w3	0.002	0.012	0.099	0.037	0.301	2.233	F3
0.006	0.018	0.067	w4	0.003	0.017	0.141	L	S	D	
0.006	0.019	0.082	w5	0.009	0.059	0.425	FUZZY BROJ			
0.015	0.046	0.176	w6	0.006	0.064	0.546				
0.024	0.131	0.529	w7	0.001	0.004	0.033				
0.052	0.204	0.680	w8	0.002	0.020	0.156				
0.064	0.161	0.455	w9	0.002	0.019	0.166				
0.026	0.067	0.206	w10	0.002	0.007	0.037				
0.025	0.063	0.189	w11	0.001	0.006	0.038				
W(kr)*W(subkr)				0.001	0.005	0.030				
				0.001	0.003	0.022				
				0.001	0.008	0.066				
				0.001	0.009	0.085				
				0.001	0.003	0.014				
				0.004	0.021	0.118				
				0.004	0.022	0.161				
				0.001	0.009	0.054				
				0.008	0.062	0.403				
				0.005	0.060	0.476				
				0.003	0.016	0.083				
				0.014	0.096	0.598				
				0.011	0.092	0.598				
				0.028	0.104	0.415				
				0.011	0.047	0.230				
				0.003	0.010	0.041				
				0.009	0.037	0.162				
				0.007	0.026	0.137				
				0.001	0.004	0.017				
				0.009	0.038	0.172				
				0.006	0.021	0.103				
				0.001	0.004	0.015				

START	Ocenjivanje kriterijuma	Ocenjivanje podkriterijuma	Ocenjivanje alternativa	PRORAČUN
-------	-------------------------	----------------------------	-------------------------	----------

Slika III-83: Prozor „Proračun“ aplikacije „Fuzzy-GWCS“

Na slici III-84 prikazani su defazifikacija i konačne težine alternativa u vidu ne-fazi broja.



Slika III-84: Prozor „OPT index“ aplikacije „Fuzzy-GWCS“

ZAKLJUČAK

Specifični algoritam, čiji se doprinos ogleda u optimalnom izboru sistema odbrane od podzemnih voda, formiran je zarad rešavanja aktuelnih i kompleksnih hidrogeoloških problema odbrane od podzemnih voda, kao i povodom odvodnjavanja različitih objekata, pod kojim se podrazumevaju: naselja, hidrotehnički objekti, priobalja, meliorativna područja i rudnici.

Tokom hidrogeoloških istraživanja na nekom području često se javljaju pitanja vezana za zasigurnost, dovoljnu preciznost i obim prikupljenih informacija ili obavljenih merenja, tako da jedan od važnih zadataka većine hidrogeoloških i hidrodinamičkih istraživanja predstavlja izbor metode, kao i njena adekvatna primena za rešavanje problema neodređenosti, nepreciznosti i neizvesnosti kod utvrđivanja hidrogeoloških parametara. Prevazilaženje ovakvih problema odnosi se na subjektivno procenjivanje hidrogeoloških parametara i njihovo izražavanje u vidu „znanja“ od strane eksperta, što zahteva heuristički pristup pomoću fazi logike.

Dobijanjem „optimalnih“ hidrogeoloških parametara pokreće se ka rešavanju sledećih zadataka: uspostavljanje kvalitetnog hidrodinamičkog modela i njegovih prognoznih proračuna iz kojih slede varijantna rešenja sistema odbrane od podzemnih voda, prikaz njegovih karakteristika kao i efekata odvodnjavanja za svaku varijantu, a zatim i izbor optimalnog rešenja, primenom višekriterijumskog odlučivanja.

Polazeći od činjenice da je često neizvestan veliki broj elemenata prilikom kreiranja modela za donošenje odluka i od toga da nije u moguće u većini slučajeva odrediti tačne numeričke vrednosti za poređenje odluka, primenjena je fazi optimizacija koja koristi logički pristup eksperta za kreiranje hijerarhije problema (cilj-kriterijumi-podkriterijumi-alternative), a zatim je primenjena i za donošenje odluke o optimalnom sistemu odbrane od podzemnih voda.

Tokom istraživanja primenjen je i testiran navedeni koncept na izuzetno složenom primeru odbrane od podzemnih voda ležišta mineralnih sirovina sa gledišta

hidrogeologije odnosno hidrodinamike. Kompleksnost problematike ovakvih područja ogleda se u njihovoj dinamičnosti, odnosno, u kontinuiranim promenama koje su vidne u stalnom širenju ležišta i koje zahtevaju efikasan i fleksibilan sistem odbrane od podzemnih voda. Primenjeni algoritam za rešavanje složenih hidrogeoloških i hidrodinamičkih problema, ogleda se u sledećem :

- u prvom koraku tretirani su koeficijenti filtracije primenom metode fazi kriginga, koji tako predstavljaju ulazne parametre za hidrodinamički model. Za razliku od dosadašnje prakse, koja se odnosila na unos koeficijenta filtracije kao homogeno raspoređene zone oko hidrogeoloških objekata, primenjeno utvrđivanje vrednosti navedenog parametra pomoću fazi kriginga i njegovog „uvoza“ u hidrodinamički model daje kvalitativno bolje rezultate, što predstavlja doprinos u primeni fazi logike u hidrogeologiji;
- u drugom koraku primenjena je kompleksna hidrodinamička analiza sa novouspostavljenim vrednostima koeficijenata filtracije, što omogućava adekvatno formiranje varijantnih rešenja sistema odbrane od podzemnih voda, kao i analizu efekata odbrane objekata od podzemnih voda;
- u trećem koraku detaljno su analizirani faktori koji utiču na izbor optimalnog sistema odbrane od podzemnih voda. S obzirom na to da se u dosadašnjoj praksi rešenje biralo uzimanjem u obzir samo ekonomskih faktora koji, međutim, ne predstavljaju jedini kriterijum prilikom izbora optimalne varijante odbrane objekata od podzemnih voda. Zbog navedenih razloga predloženi su sledeći kriterijumi i njihovi podkriterijumi:

tehnički kriterijumi, koji obuhvataju:

- vreme ,
- prilagođenost hidrogeološkim uslovima,
- efikasnost,
- fleksibilnost i
- pouzdanost

ekonomski kriterijumi, koji obuhvataju:

- investicione troškove,
- troškove funkcionisanja sistema i
- troškove održavanja

kriterijumi uticaja na životnu sredinu, koji obuhvataju:

- opadanje nivoa podzemnih voda ,
- kvalitet i količina iscrpljenih voda i
- štednju energije.

- u četvrtom koraku izvršeno je ocenjivanje kriterijuma, podkriterijuma i alternativa pomoću metode fazi analitičko hijerarhijskog procesa i doneta je konačna odluka o optimalnom sistemu odbrane od podzemnih voda. Posebno je za te svrhe kreirana aplikacija „Fuzzy-GWCS”. Ovakvim postupkom je u hidrogeologiju implementirana fazi optimizacija, koja omogućava donošenje odluke kod rešavanja problema u uslovima gde treba uvažiti postojanje više rešenja, a suprostavljenih kriterijuma, pri čemu se analizom svih postavljenih faktora dobija optimalno rešenje.

Prikazanim multidisciplinarnim pristupom koji povezuje hidrogeologiju i hidrodinamiku sa fazi optimizacijom, odnosno, hidrogeologiju i hidrodinamiku sa matematikom, logikom i višekriterijumskim odlučivanjem, doprinosi se kvalitetnom i održivom upravljanju problematikom odvodnjavanja na područjima i na objektima ugroženim od podzemnih voda.

LITERATURA

Abramov K.S. & Skirgelo B.O. (1968). Osušenie šahtnih i karernih polej, 255 pp. Moskva: Nedra.

Agartan E. & Yazicigil H. (2012) Assessment of Water Supply Impacts for a Mine Site in Western Turkey. *Mine Water and the Environment*, 31: 112–128.

Ahmed M. (2015). The Use of Fuzzy Logic and Geostatistical Techniques for Spatialization of Soil Texture in Part of Kano Close Settled Zone Kano State, Nigeria. *International Journal of Agriculture, Forestry and Fisheries*, 3(3): 115-122.

Anderson M.P. & Woessner W.W. (1992). Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport, 383 pp. San Diego: Academic Press.

Ardakanian R. & Zarghami M. (2004). Sustainability criteria for ranking of water resources projects. First national conference on water resources management. Iranian Water Resources Association, Tehran.

Ayag Z. & Ozdemir R.G. (2006). A fuzzy AHP approach to evaluating machine tool alternatives. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17: 179-190.

Bachmat Y. (1980). Groundwater management - the use of numerical models, 127 pp. Washington: American Geophysical Union.

Bahrami S., Ardejani F.D., Aslani S. & Baafi E. (2014) Numerical modelling of the groundwater inflow to an advancing open pit mine: Kolahdarvazeh pit, Central Iran. *Environmental Monitoring Assessment*, 10.1007/s10661-014-4025-x.

Bajić D. & Polomčić D. (2008). 3D Hydrogeological model of the limonite ore body „Buvač” (Republika Srpska, Bosnia and Herzegovina). In Pavlović V (Ed.), Proceedings of the IV International Conference “Coal 2008”, pp 1-9. Belgrade, Serbia: Yugoslav Opencast Mining Committee.

Bajić D. & Polomčić D. (2012). A conceptual hydrogeological model for open pit mine „Polje E” (Kolubara coal basin, Serbia). In Růžicka J. & Růžicková K (Ed.), Proceedings of the GIS Ostrava 2012 - Surface models for geosciences symposium, pp 1-12. Ostrava, Czech Republic: Vysoká škola báňská - Technical University of Ostrava.

Bajić D. & Polomčić D. (2014). Fuzzy optimization in hydrodynamic analysis of groundwater control systems: Case study of the pumping station “Bezdan 1”, Serbia. *Geološki anali Balkanskog poluostrva*, 75: 103-110. DOI: 10.2298/GABP1475103B

Bajić D. & Polomčić D. (2015). Aplikacija FUZZY-GWCS. Beograd: Centar za Modeliranje podzemnih voda, Rudarsko-geološki fakultet.

Bajić D., Polomčić D., Ristić-Vakanjac V. & Čokorilo M. (2013). Groundwater balance at open pit mine „Buvač” (Republic of Srpska). *Zapisi Srpskog Geološkog Društva*, 69-80.

Bajić D., Polomčić D., Jemcov I. (2014). The purpose of fuzzy logic in hydrogeological practice. In Cvetković V. (Ed.), Proceedings of the XVI Serbian Geological Congress, Donji Milanovac, Serbia, 22-25 May 2014, pp. 424-429. Belgrade: Serbian Geological Society. ISBN: 978-86-86053-14-5

Bandemera H. & Gebhardt A. (2000). Bayesian fuzzy kriging. *Fuzzy Sets and Systems*, 112(3): 405-418.

Bardossy A. (1988). Notes on the robustness of kriging systems. *Mathematical Geology*, 20(3): 189-203.

-
- Bardossy A., Bogardi I. & Kelly W.E. (1988). Imprecise (fuzzy) information in geostatistics. *Mathematical Geology*, 20(4): 287-311.
- Bardossy A., Bogardi I. & Kelly W.E. (1989). Geostatistics utilizing imprecise (fuzzy) information. *Fuzzy Sets and Systems*, 31: 311-327.
- Bardossy A., Bogardi I. & Kelly W.E. (1990a). Kriging with imprecise (fuzzy) variograms I. *Mathematical Geology*, 22: 63-79.
- Bardossy A., Bogardi I. & Kelly W.E. (1990b). Kriging with imprecise (fuzzy) variograms II. *Mathematical Geology*, 22: 81-94.
- Bartels F. (1996). Analyse und Auswertung raumlicher Daten unter Anwendung der Fuzzy-Set-Theorie (Analysis and evaluation of spatial data with fuzzy set theory). Kiel: University of Kiel.
- Basligil H. (2005). The fuzzy analytic hierarchy process for software selection problems. *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2: 24-33.
- Beale G. (2009). Hydrogeological model. In Read J. & Stacey P. (Eds.), *Guidelines for Open Pit Slope Desig*, 141-200 pp. Melbourne: CSIRO Publishing.
- Bear J. (1979). *Hydraulics of groundwater*, 604 pp. Haifa, Israel: McGraw-Hill.
- Bellman R.E. & Zadeh L.A. (1960). Decision making in fuzzy environment. *Management Science*, 17(4): 141-164.
- Bentivegna V., Mondini G., Nati Poltri F. & Pii R. (1994). Complex evaluation methods: An operative synthesis on multicriteria techniques. In *Proceedings of the IV international conference on engineering management*, pp. 1-18. Melbourne.
- Bezdeck J.C. (1981). *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*, 256 pp. New York: Plenum Press.

-
- Black M. (1937). Vagueness: An exercise in logical analysis. *Philosophy of Science* 4: 427-455. Reprinted In R. Keefe & P. Smith (Ed.), 1997, Cambridge: MIT Press.
- Boender C.G.E., De Graan J.G. & Lootsma F.A. (1989). Multicriteria Decision Analysis with Fuzzy Pairwise Comparisons. *Fuzzy Sets and Systems*, 29: 133-143.
- Bojadziev G. & Bojadziev M. (1995). Fuzzy sets, fuzzy logic, applications. Singapore: World Scientific Publishing.
- Boskidisa I., Pisinarasa V., Petalasa C. & Tsihrintzisa V.A. (2012) Monitoring and modeling of two alluvial aquifers in lower Nestos river basin, Northern Greece. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 47(12): 1849-1868.
- Bouyssou D., Marchant T., Pirlot M., Perny P., Tsoukias A. & Vincke P. (2000). Evaluation Models: A Critical Perspective, 274 pp. Boston: Kluwer.
- Bozdag C.E., Kahraman C. & Ruan D. (2003). Fuzzy group decision making for selection among computer integrated manufacturing systems. *Computer in Industry*, 51: 13-29.
- Brassington R. (2007). Field hydrogeology, 3rd edn., 276 pp. Chichester: John Wiley & Sons.
- Brawner CO (1982) Control of groundwater in surface mining. *Mine Water and the Environment*, 1(1): 1-16.
- Brown K. & Trott S. (2014) Groundwater flow models in open pit mining: Can we do better?. *Mine Water and the Environment*, (33): 187-190.
- Buckley J.J. (1985). Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 17: 233-247.

Buckley J.J., Eslami E. & Feuring T. (2002). Fuzzy mathematics in economics and engineering, 272 pp. Heidelberg: Physica-Verlag.

Buhač D., Bukvić B., Stevanović-Petrović N. & Cojić M. (2012). Design solution of open pit „South Field” dewatering from surface and underground water, coal basin Kolubara. In Pavlović V. (Ed.), Proceedings of the X International Opencast Mining Conference OMC 2012, pp. 19-32. Belgrade, Serbia: Yugoslav Opencast Mining Committee.

Caha J., Tuček P., Vondrakova A. & Paclikova L. (2012). Fuzzy surface models based on kriging outputs. In Růžicka J. & Růžicková K (Ed.), Proceedings of the GIS Ostrava 2012 - Surface models for geosciences symposium, pp 1-9. Ostrava, Czech Republic: Vysoká škola báňská - Technical University of Ostrava.

Cashman P.M., Preene M. (2001). Groundwater lowering in construction: a practical guide, 674 pp. London: Spon Press.

Chan F.T.S., & Kumar N. (2007). Global supplier development considering risk factors using fuzzy extended AHP-based approach. *Omega International Journal of Management Science*, 35: 417-431.

Chang P.L. & Chen Y.C.A. (1994) A fuzzy multi-criteria decision making method for technology transfer strategy selection in biotechnology. *Fuzzy sets and systems*, 63: 131-139.

Chang D.Y. (1992). Extent analysis and synthetic decision. In Optimization Techniques and Applications, 352 pp. Singapore: World Scientific.

Chang D.Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95: 649-655.

Chang Y.H., Cheng C.H. & Wang T.C. (2003). Performance evaluation of international airports in the region of east Asia. In Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 4: 213-230.

Chen C.T., Lin C.T. & Huang, S.F. (2006). A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management. *International Journal of Production Economics*, 102: 289-301.

Cheng C.H. (1996). Evaluating naval tactical missile systems by fuzzy AHP based on the grade value of membership function. *European Journal of Operational Research*, 96: 343-350.

Chiang W.H. (2005). Processing ModflowTM, WebTech360, 409 pp.

Chiang W.H. & Kinzelbach W. (2001). 3D-groundwater modeling with PMWIN, 346 pp. New York: Springer.

Choi S.J., Kim J.H. & Lee D.R. (2012). Decision of the water shortage mitigation policy using multi-criteria decision analysis. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(2): 247-253.

Chou T.Y. & Liang G.S. (2001). Application of a fuzzy multi-criteria decision making model for shipping company performance evaluation. *Maritime Policy and Management*, 28(4): 375-392.

Cressie N. (1993). Statistics for spatial data, pp. 900. New York: John Wiley & Sons.

Damjanović D. (1969) Odvodnjavanje površinskih otkopa u rudarstvu, 152 pp. Beograd: Građevinska knjiga

De Smith M.J., Goodchild M.F., Longley P.A. (2007). Geospatial analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools, 394 pp. Leicester, UK.

Deng H. (1999). Multicriteria analysis with fuzzy pair-wise comparison. *International Journal of Approximate Reasoning*, 21: 215-231.

Diamond P. (1989). Fuzzy kriging. *Fuzzy Sets and Systems*, 33(3): 315-332.

Dimkić M., Pušić M., Vidović D., Đurić D. & Boreli-Zdravković Đ. (2013). Analiza transporta zagađenja kod određivanja zona sanitarne zaštite izvorišta podzemnih voda u aluvijalnim sredinama. *Vodoprivreda*, 264-266: 203-218.

Doherty E.J. & Hunt J.R. (2010). Approaches to Highly Parameterized Inversion: A Guide to Using PEST for Groundwater-Model Calibration, Scientific Investigations Report 2010-5169, 59 pp. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.

Domenech L., March H. & Sauri D. (2013). Degrowth initiatives in the urban water sector - a social multi-criteria evaluation of nonconventional water alternatives in Metropolitan Barcelona. *Journal of Cleaner Production*, 38: 44-55.

Dragišić V. (2005). Hidrogeologija ležišta mineralnih sirovina, 242 pp. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.

Dubois D. & Prade H. (1979). Fuzzy Real Algebra: Some Results. *Fuzzy Sets and Systems*, 2(4): 327-348.

Dubois D. & Prade H. (1980). Fuzzy sets and systems: Theory and applications, 391 pp. New York: Academic press.

Dubois D. & Prade H. (1986). Fuzzy sets and statistical data. *European Journal of Operational Research*, 25(3): 435-356.

Dubois D. & Prade H. (1987). *Theorie des Possibilités - Applications à la Representation des Connaissances en Informatique*, 292 pp. Paris: Masson.

Dubois D. & Prade H. (1998). Soft computing, fuzzy logic, and artificial intelligence. *Soft computing*, 2(1): 7-11.

Dubois D. & Prade H. (2000). *Fundamentals of Fuzzy Sets*, 653 pp. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers.

Dyer J.S. (1990). Remarks on the analytic hierarchy process. *Management Science*, 36(3): 249-258.

Dyer J.S. (1990a). A clarification of "Remarks on the analytic hierarchy process". *Management Science*, 36(3): 274-275.

Đukić D. (1984) *Geomehanika u površinskoj eksploataciji*, Tuzla: Institut za rudarska istraživanja Tuzla.

Đurić D., Lukić V. & Soro A. (2012). Hidrodinamička analiza proširanja izvorišta „Petrovaradinska Ada” u Novom Sadu. *Vodoprivreda*, 258-260: 265-272.

Eichler AR & Drebenstedt C (2014) Innovative Dewatering Concepts for Open Cast Mines Using Horizontal Wells (HDD-Wells). *Mine Planning and Equipment Selection*, DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7_67.

Electronic reference formats recommended by the American Society for Testing and Materials (02.07.2014.) American Society for Testing and Materials. Retrieved from: <http://www.astm.org/DATABASE.CART/WITHDRAWN/D5447.htm>

Electronic reference formats recommended by Aquaveo (14.08.2014). Aquaveo. Retrieved from: <http://www.aquaveo.com/gms-intro>

Electronic reference formats recommended by HydroGeoLogic (14.08.2014). HydroGeoLogic. Retrieved from: http://www.hglsoftware.com/Modflow_Surface.cfm

Enea M. & Piazza T. (2004). Project selection by constrained fuzzy AHP. *Fuzzy optimization and decision making*, 3: 39-62.

Electronic reference formats recommended by the International Symposium on the Analytic Hierarchy Process (21. 05. 2014). Washington DC: ISAHp. Retrieved from: <http://www.isahp.org/proceedings/>

Electronic reference formats recommended by Waterloo Hydrogeologic (14.08.2014.) Waterloo Hydrogeologic. Retrieved from: <http://www.swstechnology.com/groundwatermodeling-software/visualmodflow-flex>

Ertugrul I. & Karakasoglu N. (2006). The fuzzy analytic hierarchy process for supplier selection and an application in a textile company. In Proceedings of 5th International symposium on intelligent manufacturing systems, pp. 195–207. Sakarya, Turkey.

Ertugrul I. & Karakasoglu N. (2009). Performance evaluation of Turkish cement firms with fuzzy analytic hierarchy process and TOPSIS methods. *Expert Systems with Applications*, 36(1): 702-715.

Ertugrul I. & Tus A. (2007). Interactive fuzzy linear programming and an application sample at a textile firm. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 6: 29-49.

Filipović B. (1980). Metodika hidrogeoloških istraživanja, 3-14 pp. Beograd: Naučna knjiga.

Filipović B, Valjarević R. (1974). Hidrogeologija ležišta mineralnih sirovina, 371 pp. Sarajevo: Univerzitet u Sarajevu

Franke O.L., Reilly T.E. & Bennett G.D. (1987) Definition of boundary and initial conditions in the analysis of saturated groundwater flow systems - an introduction. In: Peck D.L. (Ed.), *Application of hydraulics*, book 3 (chapter B5). Washington: United States Government printing office.

Frind E.O., Molson J.W. & Rudolph D.L. (2006). Well Vulnerability: A Quantitative Approach for Source Water Protection. *Ground Water*, 44(5): 732-742.

Gödeke S. (2011). Simulation of groundwater mounding at a West Australian mine site. *Environmental Earth Science*, 64(5): 1363-1373.

Graan, J.G. (1980). Extensions to the Multiple Criteria Analysis Method of T.L. Saaty. Voorburg, The Netherlands: National Institute for Water Supply.

Graham I. (1991). Uncertainty and expert systems, 363 pp. Bristol: University of Bristol.

Gu X., & Zhu Q. (2006). Fuzzy multi-attribute decision making method based on eigenvector of fuzzy attribute evaluation space. *Decision Support Systems*, 41: 400-410.

Haans M. (2005). Applied fuzzy Arithmetic - an introduction with engineering applications, 256 pp. Springer.

Hajdin B., Polomčić D., Stevanović Z., Bajić D. & Hajdin K. (2012). Asseings prospect of groundwater source „Vić Bare“ for Obrenovac's water supply. Proceedings of the XIV Serbian Symposium on Hydrogeology, pp. 107-111. Belgrade: University of Belgrade - Faculty of mining and geology.

Hanna T.M., Azrag E.A. & Atkinson L.C. (1994) Use of an analytical solution for preliminary estimates of groundwater inflow to a pit. *Mining Engineering* 46(2): 149-152.

Haq A.N. & Kannan G. (2006). Fuzzy analytical hierarchy process for evaluating and selecting a vendor in a supply chain model. *International Journal of Advanced Manufacturing*, 29: 826-835.

Harbaugh A.W., Banta E.R., Hill M.C. & McDonald M.G. (2000). Modflow-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model - user guide to modularization concepts and the ground-water flow process, open-file report 00-92, 121 pp. Reston, USA: U.S. Geological Survey.

Hartman H.L. & Mutmanský J.M. (2002). Introductory mining engineering, 571 pp. New Jersey: John Wiley & Sons.

Harker P.T., Vargas L.G. (1990) Reply to "Remarks on the analytic hierarchy process" by JS Dyer. *Management Science*, 36(3): 269-273.

Hsieh T.Y., Lu S.T. & Tzeng G.H. (2004). Fuzzy MCDM approach for planning and design tenders selection in public office buildings. *International Journal of Project Management*, 22: 573-584.

Ilić S., Polomčić D., Dimitrijević B. & Dimkić G. (2006a) Analysis of current technologies of dewatering screens construction in Serbia. In Pavlović V. (Ed.), Proceedings of the VII International conference Nonmetals 2006, pp. 106-110. Belgrade, Serbia: Yugoslav Opencast Mining Committee.

Ilić S., Polomčić D., Jovović S. & Živković D. (2006b) Additional geologic explorations for needs of dewatering screens construction on open pit mine Drmno. In Pavlović V. (Ed.), Proceedings of the VII International conference Nonmetals 2006, pp. 111-121. Belgrade, Serbia: Yugoslav Opencast Mining Committee.

Institut za geološka istraživanja (1973). Studija hidrogeološke i hidrološke karakteristike područja ležišta "Omarska". Sarajevo.

Jagodić Krunić D., Jovičić V. (2007). Shifting of the Kolubara in terms of dynamic development mining proceeding and opening new open pits in the central part of Kolubara's coal basin, Proceedings of the VIII International conference of Surface Mining OMC 2007, Vrujci Spa, Serbia, 17-20 October, 2007; Pavlović V, Eds.; Yugoslav Opencast Mining Committee: Belgrade, 2007, 67-74.

Jansen D., Bodarwé H., Demny G. & Köngeter J (1998). Integrated Groundwater Management for Open Pit Mining Regions: The Role of Sophisticated Numerical Tools for Interactive Monitoring, Predictive Modelling and Decision-Making. *Restoration of Degraded Rivers: Challenges, Issues and Experiences NATO ASI Series*, 39: 399-415.

Jensen J.L., Lake L.W., Corbetti P.W.M. & Goggin, D.J. (1997). Statistics for Petroleum Engineers and Geoscientists, pp. 390. New Jersey: Prentice Hall PTR.

Jiang S., Kong X., Ye & Zhou N. (2013). Groundwater dewatering optimization in the Shengli no. 1 open-pit coalmine, Inner Mongolia, China. *Environmental Earth Science*, 69: 187–196.

Jovičić V, Čović A. (1975). Odvodnjavanje rudnika. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.

Junfeng J., Diersch G.H-J., Monninkhoff M-M.L. (2012). 3D Modeling of Saline Groundwater Flow and Transport in a Flooded Salt Mine in Stassfurt, Germany. *Mine Water and the Environment*, 31: 104-111.

Kaccwicz M. (1994). Fuzzy geostatistics - an integration of qualitative description into spatial analysis, fuzzy sets and systems. In Dimitrakopoulos R. (ed.), *Geostatistics for the next century*, p. 448-463. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Kahraman C. (2001). Capital budgeting techniques using discounted fuzzy cash flows. In Ruan D., Kacprzyk J., & Fedrizzi M. (Ed.), *Soft computing for risk evaluation and management: Applications in technology, environment and finance*, pp. 375-396. Heidelberg: Physica-Verlag.

Kahraman C., Cebeci U. & Ruan D. (2004). Multi-attribute comparison of catering service companies using fuzzy AHP: The case of Turkey. *International Journal of Production Economics*, 87: 171-184.

Kahraman C., Ruan D. & Dogan I. (2003). Fuzzy group decision making for facility location selection. *Information Sciences*, 157: 135-153.

Kahraman C., Ruan D. & Tolga E. (2002). Capital budgeting techniques using discounted fuzzy versus probabilistic cash flows. *Information Sciences*, 42:(1-4): 57-76.

Kaufmann A. & Gupta M.M. (1985). *Introduction to Fuzzy Arithmetic*, 384 pp. New York: Van Nostrand Reinhold.

Kaufmann A., Gupta M.M. (1988). *Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science*, 362 pp. Amsterdam: North Holland.

Kecojević V. (2000). Metodika izbora objekata i sistema odvodnjavanja u površinskoj eksploataciji, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.

Kecojevic V.J., Mrugala M.J., Simic R.D., Stankovic R.M. (2003). A computer-aided system for design of drainage facilities in surface mining. *Mine Water Environ* 22(3): 149-154.

Kholghi M. & Hosseini S.M. (2006). Estimation of Aquifer Transmissivity using Kriging, Artificial Neural Network, and Neuro-Fuzzy models. *Journal of Spatial Hydrology*, 6(2): 68-81.

-
- Klir G.J. & Yuan B. (1995). *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Application*, 592 pp. Upper Saddle River: Prentice Hall Inc.
- Komatina M. (1990). *Rudnička hidrogeologija. Hidrogeološka istraživanja III, primenjena hidrogeologija*, 391 pp. Beograd: Geozavod.
- Kosko B. (1993). *Fuzzy thinking: The new science of fuzzy logic*, 336 pp. New York: Hyperion.
- Krešić N. (2006). *Hydrogeology and Groundwater Modeling*, 828 pp. CRC Press/Taylor & Francis Group
- Krešić N. & Mikszewski A. (2012). *Hydrogeological conceptual site models; data analysis and visualisation*, 600 pp. CRC Press/Taylor & Francis Group
- Krige D.G. (1951). A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, 52: 119-139.
- Kumar C.P. (2006). Groundwater Modelling and Management. In Ghosh N.C. & Sharma K.D. (Ed.), *Ground Water Modelling*, pp. 153-178. New Delhi: Capital Publishing Company.
- Kwang H.C. & Lee H.J. (1999). A method for ranking fuzzy numbers and its application to decision making. *IEEE Transaction on Fuzzy Systems*, 7(6): 677-685.
- Deb K.P. (2013). *An Introduction to Mine Hydrogeology*, 70 pp. New York: Springer International Publishing.
- Lai Y.J. & Hwang C.L. (1996). *Fuzzy multiple objective decision making*, 591 pp. Berlin: Springer.

Lamata M.T. (2004) Ranking of alternatives with ordered weighted averaging operators. *International Journal of Intelligent Systems*, 19: 473-482.

Lena J. (1985). On Fuzzy Linear Programming, *European Journal of Operational Research*, 22(2): 216-223.

Leung L. & Cao D. (2000). Theory and methodology in consistency and ranking of alternatives in fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 124: 102-113.

Li T., Song H., Huang G., Bi Y. & Li H. (2014) Assessment of groundwater changing trends through the generalized large well method with confined–unconfined flow model in open-pit mine area. *Environmental Earth Science*, 10.1007/s12665-014-3357-8.

Liberatore M.J., Nydick R.L. & Sanchez P.M. (1992). The evaluation of research papers (or how to get an academic committee to agree on something). *Interfaces*, 22: 92-100.

Libicki Y. (1985). Proposal of criteria for selection of dewatering methods in surface mining, pp. 105-112. Proceedings of the 2nd International mine water assoc congress. Granada: International Mine Water Association.

Lilly J. (2010) Fuzzy control and identification, 231 pp. New Jersey: John Wiley & Sons.

Liou T.S. & Wang M.J.J. (1992). Ranking fuzzy numbers with integral value. *Fuzzy Sets and Systems*, 50(3): 247-256.

Lootsma F.A. (1981). Saaty's priority theory and the nomination of a senior professor in operations research. *European Journal of Operational Research*, 4(6):380-388.

Lootsma F.A. (1988). Numerical scaling of human judgment in pairwise-comparison methods for fuzzy multi-criteria decision analysis, Mathematical Models for Decision Support. *Computer and System Sciences, NATO ASI Series*, 48: 57-88.

Lootsma F.A. (1990). The French and the American school in multi-criteria decision analysis. *RAIRO/Recherche opérationnelle/Operations Research*, 24(3): 263-285.

Lootsma F.A., Mensch T.C.A. & Vos F.A. (1990). Multi-criteria analysis and budget reallocation in long-term research planning. *European Journal of Operational Research*, 47: 293-305.

Lootsma F. A. (1997). Fuzzy logic for planning and decision making, 198 pp. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers.

Łukasiewicz J. (1920). O logice trójwartościowej (in Polish). *Ruch filozoficzny* 5:170–171, 1920. Reprinted In L. Borkowski (Ed.), 1970, On three-valued logic, Selected works by Jan Łukasiewicz. Amsterdam: North-Holland.

Majkić-Dursun B., Popović Lj., Miolski D. & Andelković O. (2012). Uticaj opadanja nivoa podzemnih voda na procese starenja vodozahvata objekata na primeru izvorišta Trnovče. *Vodoprivreda*, 258-260: 181-187.

Malvić, T. (2008). Kriging geostatistička interpolacijska metoda, 18 pp. Zagreb: Hrvatsko geološko društvo.

Mamdani E.H. (1977) Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic systems. *IEEE Transactions on Computers*, 26: 1182-1191.

Mansel H., Drebenstedt C., Jolas P. & Blankenburg R. (2012). Dewatering of Opencast Mines using Horizontal Wells. In: McCullough C.D. & Lund M.A., Wyse, L. (Ed.) International Mine Water Association Symposium, pp. 574 A - 574 I. Bunbury, Australia.

Marinelli F. & Niccoli W.L. (2000) Simple analytical equations for estimating ground water inflow to a mine pit. *Ground Water* 38(2): 311-314.

Masoumi I., Naraghi S., Rashidi-Nejad F. & Masoumi S. (2014). Application of fuzzy multi-attribute decision-making to select and to rank the post-mining land-use. *Environmental Earth Science*, 72:221-231.

Mayer W. (1990). Expert systems in factory management: Knowledge Based Computer Integrated Manufacturing (Ellis Horwood Books in Information Technology). Chichester, United Kingdom: Ellis Horwood Ltd.

McNeill F.M. & Thro E. (1994). Fuzzy logic - a practical approach, 350 pp. London: Academic Press.

Milanović R., Pavlović M. & Radisavljević Z. (2012) Analysis of the wells line LC-XI operation within the system of the open cast coal mine Drmno pre-dewatering. In Pavlović V. (Ed.), Proceedings of the X International Opencast Mining Conference OMC 2012, pp. 221-229. Belgrade, Serbia: Yugoslav Opencast Mining Committee.

Milojević N, Filipović B. (1966). Odabrana poglavlja iz predmeta hidrogeologija rudnih ležišta. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.

Miletić & Heinrich-Miletić (1981). Uvod u kvantitativnu hidrogeologiju, 220 pp. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

Miller G.A. (1956). The magical number seven plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63: 81-97.

Ministarstvo zdravlja R. Srbije (1997). Pravilnik o uslovima i načinu fluorisanja vode za piće, Službeni glasnik RS, br. 6/1997.

Morton K.L., van Mekerck F.A. (1993). A phased approach to mine dewatering. *Mine Water and Environment*, 12: 27-33

Moutsopoulos N.K., Gemitzi A. & Tsihrintzis A.V. (2008). Delineation of groundwater protection zones by the backward particle tracking method: theoretical background and GIS-based stochastic analysis. *Environmental Geology*, 54: 1081-1090.

Mylopoulosa N., Mylopoulosb Y., Kolokythab E., Tolikas D. (2007). Integrated water management plans for the restoration of lake Koronia, Greece. *Water International*, 32(1): 720-738.

Obradović T. & Đoković M. (2008) The system of estimation of influences on environment - relation with mining law. In Pavlović V. (Ed.), Proceedings of the IV International Conference "Coal 2008", pp. 354-362. Belgrade, Serbia: Yugoslav Opencast Mining Committee.

Orchard R.A. (1998). Fuzzy CLIPS Version 6.04A, User's Guide, Integrated Reasoning. Canada: National Research Council.

Patriche C.V., Rosca B., Parnau R.B. & Stoica D.L. (2012). Spatial prediction of soil qualitative variables using logistic regression and fuzzy techniques. Study region: Dobrovăț basin (Central Moldavian Plateau). *Georeview*, 21: 46-55.

Pavlović V. & Šubaranović T. (2007). Visibility analysis of manufacturing waterproof screen on the example of open pit mine Drmno. In Pavlović V. (Ed.), Proceedings of the VIII International conference of Surface Mining OMC 2007, pp. 203-207. Belgrade, Serbia: Yugoslav Opencast Mining Committee.

Pavlović V. & Šubaranović T. (2012) Pouzdanost, optimizacija i upravljanje sistemima odvodnjavanja površinskih kopova, 522 pp. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.

Pavlović V., Šubaranović T., Polomčić D. (2012). Sistemi odvodnjavanja površinskih kopova. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.

Perović A., Jovanović A. & Veličković B (2007). Teorija skupova: matematička teorija beskonačnosti, 502 pp. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet.

Piotrowski J.A., Bartels F., Salski A. & Schmidt G. (1996a). Geostatistical Regionalization of Glacial Aquitard Thickness in Northwestern Germany, Based on Fuzzy Kriging. *Mathematical Geology*, 28(4): 437-452.

Piotrowski J.A., Bartels F., Salski A. & Schmidt G. (1996b). Estimation of hydrogeological parameters for groundwater modelling with fuzzy geostatistics: closer to nature?. Proceedings of the International Conference on Calibration and Reliability in Groundwater Modelling, pp. 511-520. Golden, Colorado, USA: Integrated groundwater modeling center.

Polomčić D. (2001). Hidrodinamička istraživanja, otvaranje i upravljanje izvorštima izdanskih voda u intergranularnoj poroznoj sredini, 196 pp. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko geološki fakultet.

Polomčić D. (2002). Schematization types of hydrogeological system for setting up the hydrodynamic model. Proceedings of the XIII Yugoslav symposium of hydrogeology and engineering geology, pp. 389-396. Belgrade: University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology.

Polomčić D. (2004). In Pavlović R. (Ed.) Bulletin of Geoinstitute, 1st edn. The influence of size of discretization of space and time on the accuracy of results in the conception of the hydrodynamic model, pp 197- 209. Belgrade: Geoinstitut.

Polomčić D. (2008) Hydrodynamical model of groundwater regime in limonite ore body "Buvač" (Republika Srpska, Bosnia and Herzegovina). Proc, IV International Conf "Coal 2008", Belgrade, Serbia, p 392-406. Yugoslav Opencast Mining Committee, Belgrade.

Polomčić D. (2014) Autorizovana predavanja iz predmeta „Modeliranje podzemnih voda 1“. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.

Polomčić D. & Bajić D. (2011). 3D Hydrodynamic model of open pit mine “Polje E” (Kolubara coal basin). In In Pavlović V (Ed.), Proceedings of the V International Conference “Coal 2011”, pp 19-22. Belgrade, Serbia: Yugoslav Opencast Mining Committee.

Polomčić D. & Bajić D. (2014). Primena hidrodinamičkih prognoznih proračuna na primeru crpne stanice „Bezdan 1“ (Application of the hydrodynamic predictive modeling on the example of the pumping station „Bezdan 1“). *Tehnika*, 69(6): 956-962.

Polomčić D. & Bajić D. (2015). Application of Groundwater modeling for designing a dewatering system: Case study of the Buvač Open Cast Mine, Bosnia and Herzegovina. *Geologia Croatica*, 68(2):123-137 doi:10.4154/gc.2015.07

Polomčić D., Bajić D. & Čokorilo Ilić M. (2014d). Modflow at the crossroad, *Zapiski Srpskog Geološkog Društva*, 173-186.

Polomčić D., Bajić D. & Ilić Z. (2014b). Implementation of alternative forecasting hydrodynamic during designing of mines defense system against groundwater on opencast mine field C example. In Pavlović V. (Ed.), Proceedings of the 11th International Opencast Mining Conference, Zlatibor, Serbia, 15-18 October 2014, pp. 321-338. Belgrade: Yugoslav Opencast Mining Committee.

Polomčić D., Bajić D. & Krunić O. (2014a). Hidrodinamička analiza interakcije dva izvorišta u radu na primeru vodosnabdevanja Bečeja (Hydrodynamic analysis of the interaction of two operating groundwater source, case study: groundwater supply of Bečej). *Tehnika*, 69(4): 597-603.

Polomčić D., Bajić D., Matić I. & Zarić J. (2013e), Hydrodynamic characteristics of water supply source of Kikinda (Serbia). Digital Proceedings of the the 8th Conference on Sustainable Development of Energy Water and Environmental Systems, SDEWES13_FP_482. Zagreb, Croatia: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture.

Polomčić D., Bajić D. & Ristić-Vakanjac V. (2012). Groundwater balance, natural recharge and drainage zones at open pit mine „Polje E“ of Kolubara Coal Basin (Republic of Serbia). In Ban M., Duic N., Guzovic Z., Klemeš J.J., Markovska N., Schneider D.R. & Varbanov P., (Ed.), CD Proceedings of the 7th Conference on Sustainable Development of Energy Water and Environmental Systems, SDEWES2012_FP_80. Zagreb, Croatia: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture.

Polomčić D., Bajić D., Ristić-Vakanjac V. & Čokorilo Ilić M. (2014c). Automatic calibration of hydrodynamic models using PEST program. *Zapisnici Srpskog Geološkog Društva*, 13-27.

Polomčić D., Bajić D., Ristić-Vakanjac V., Čokorilo M., Drašković D. & Špadijer S. (2013c). Hidrodinamičke karakteristike izvorišta „Peštan“ za vodosnabdevanje Lazarevca, *Vodoprivreda*, 261-263: 55-68.

Polomčić D., Bajić D., Papić P. & Stojković J. (2013a). Hydrodynamic model of the open-pit mine “Buvač” (Republic of Srpska). *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 1(3): 260-271. DOI: 10.13044/j.sdewes.2013.01.0019

Polomčić D., Bajić D., Zarić J. (2015). Determining the Groundwater Balance and Radius of Influence Using Hydrodynamic Modeling: Case Study of the Groundwater Source Šumice in Serbia. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 3(3): 217-229. doi: 10.13044/j.sdewes.2015.03.0017

Polomčić D., Dragišić V. & Živanović V. (2005) Hydrodynamic model of the groundwater source for water supply of Prijedor town (Republic of Srpska). Proceedings of the International Conference & Field Seminar - Water Resources & Environmental Problems in Karst, pp. 539-544. Belgrade, Serbia: University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology.

Polomčić D., Đekić M., Milosavljević S., Popović Z., Milaković M., Ristić Vakanjac V. & Krunić O. (2011b) Sustainable use of groundwater resources in terms of increasing the capacity of two interconnected groundwater sources: a case study Bečej (Serbia). Proceedings of the 11th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, p. 599-606. Sofia, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd.

Polomčić D., Hajdin B., Stevanović Z., Bajić D. & Hajdin K (2013d). Groundwater management by riverbank filtration and an infiltration channel: The case of Obrenovac, Serbia. *Hydrogeology Journal*, 21(7): 1519-1530.

Polomčić D., Krunić O. & Ristić-Vakanjac V. (2011a). Hydrogeological and hydrodynamic characteristics of groundwater sources for the public water supply of Bečej (northern Serbia), *Geološki anali balkanskog poluostvra*, 72: 143-157.

Polomčić D., Pavlović V., Bajić D. & Šubaranović T. (2013b). Multiannual effects of Peštan source operation in the function of predewatering the future Kolubara basin opencast mines. In Pavlović V, (Ed.), Proceedings of the VI International Conference "Coal 2013", pp 259-266. Belgrade, Serbia: Yugoslav Opencast Mining Committee.

Polomčić D., Pavlović V. & Šubaranović V. (2012). Dewatering system selection at the open cast mine Drmno using hydrodynamic forecasting calculations. In Pavlović V. (Ed.), Proceedings of the X International Opencast Mining Conference OMC 2012, pp. 275-290. Belgrade, Serbia: Yugoslav Opencast Mining Committee.

Polomčić D., Ristić Vakanjac V., Bajić D. & Čokorilo Ilić M. (2014e). Simulacija režima karstne izdani primenom 3D hidrodinamičkog modela na primeru Pirotске kotline i karstnog masiva Stare planine. *Pirotski zbornik*, 51-70.

Polomčić D., Ristić Vakanjac V., Bajić D., Čokorilo Ilić M. & Jovanov K. (In Press). Hidrodinamička analiza režima podzemnih voda ležišta uglja „Suvodol“ (Republika Makedonija). *Zapisnici Srpskog Geološkog Društva*.

Polomčić D. & Šubaranović T. (2006) Test of dewatering screen model on example of Drmno deposit. In Pavlović V. (Ed.), Proceedings of the VII International conference Nonmetals 2006, pp. 327-334. Belgrade, Serbia: Yugoslav Opencast Mining Committee.

Pušić M. (1994). Dinamika podzemnih voda. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet.

Qiao X., Li G., Li M., Zhou J., Du J., Du C. & Sun Z. (2011). Influence of coal mining on regional karst groundwater system: a case study in West Mountain area of Taiyuan City, northern China. *Environmental Earth Science*, 64:1525-1535.

Rapantova N., Grmela A., Vojtek A., Halir J., Michalek B. (2007) Ground Water Flow Modelling Applications in Mining Hydrogeology. *Mine Water and the Environment*, 26 (4): 264-270.

Read J., Jakubec J. & Beale G. (2009). Field data collection. In: Read J. & Stacy P. (Eds) Guidelines for open pit slope design, pp 15-52. Collingwood: CSIRO.

Rezaei-Moghaddam K. & Karami E. (2008). A multiple criteria evaluation of sustainable agricultural development models using AHP. *Environmental, Development and Sustainability*, 10(4): 407-426.

Ross T.J. (2004). Fuzzy Logic with Engineering Applications, 606 pp. New Jersey: John Wiley & Sons.

Rumbaugh J.O., Rumbaugh D.B. (2007). Guide to using Groundwater Vistas: version 5. Environmental Simulations, New York.

Rumbaugh J.O. & Rumbaugh D.B. (2011). Guide to using Groundwater Vistas: version 6. New York: Environmental Simulations.

Schöpf M. (2008) Cut-off walls as barrier against horizontal water ingress in open coal mines. In Pavlović V. (Ed.), Proceedings of the IV International Conference “Coal 2008”, pp. 466-475. Belgrade, Serbia: Yugoslav Opencast Mining Committee.

Saaty T.L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15: 234-281.

Saaty T.L. (1980). The analytic hierarchy process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation, 287 pp. New York: McGraw-Hill.

Saaty T.L. (2000). Fundamentals of Decision Making and Priority Theory With the Analytic Hierarchy Process, 477 pp. Pittsburgh, PA: RWS Publications.

Saaty T.L., Cho Y. (2001) The decision by the US Congress on China's trade status: A multicriteria analysis. *Socio-Economic Planning Sciences*, 35(6): 243-252.

Saaty T.L. (2005). Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs and Risks, 352 pp. Pittsburgh, PA: RWS Publications.

Saaty T.L. & Peniwati K. (2007). Group decision-making: Drawing out and reconciling differences, 385 pp. Pittsburgh, PA: RWS Publications.

Saaty T.L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1): 9-26.

Saaty T.L. (1990a) An exposition of the AHP in reply to the paper “Remarks on the analytic hierarchy process”. *Management Science*, 36(3): 259-268.

Saaty T.L. (2011). Aligning the measurement of tangibles with intangibles and not the converse. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 3(1): 79-87.

Saaty T.L. & Vargas L.G. (1990). Prediction, projection and forecasting: Applications of the Analytic Hierarchy Process in Economics, Finance, Politics, Games and Sports, 272 pp. Springer.

Sanguanduan N., & Nititvattananon V. (2011). Strategic decision making for urban water reuse application: a case from Thailand. *Desalination*, 268(1-3): 141-149.

Shevenell L. (2000) Analytical method for predicting filling rates of mining pit lakes: example from the Getchell Mine, Nevada. *Mining Engineering* 52(3): 53-60.

Simić R., Mršović D. & Pavlović V. (1984). Odvodnjavanje površinskih kopova, 261 pp. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.

Simić R. (1994). Tehnologija odvodnjavanja površinskih kopova, 471 pp. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.

Simić R. & Kecojević V. (1997a). Objekti za odvođenje voda na površinskim kopovima, 202 pp. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.

Simić R. & Kecojević V. (1997b). Bunari u sistemima odvodnjavanja površinskih kopova, 237 pp. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.

Simić R., Prohaska S., Petković S. & Dimitrijević S. (1999). Regulacija i izmeštanje površinskih kopova, 190 pp. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.

Stauder S., Stevanović Z., Richter C., Milanović S., Tucović A. & Petrović B. (2012). Evaluating bank filtration as an alternative to the current water supply from Deeper Aquifer: a case study from the Pannonian Basin, Serbia. *Water Resource Management*, 26 (2): 581-594.

Stepanović S., Šubaranović T., Majstorović J. (2011) Effects of horizontal borehole application in the open pit dewatering system on slope stability. In Hristov S., Dedelyanova K., & Georgiev K. (Ed.), Proceedings of 10th Jubilee national conference with international participation of the open and underwater mining of minerals, 367-375 pp. Sofia, Bulgaria: Scientific and Technical Union of Mining, Geology and Metallurgy.

Stevanović Petrović N., Bukvić B. & Buhač D. (2011). Protection area of coalfield of groundwater and surface water. In Pavlović V. (Ed.), Proceedings of the V International Conference “Coal 2011“, pp. 331-338. Belgrade, Serbia: Yugoslav Opencast Mining Committee.

Stevanović Petrović N., Stojanović S. & Cojić M. (2013) Peštan riverbed replacing for opening phase of new open pit “E” - Kolubara coal basin. In Pavlović V. (Ed.), Proceedings of the VI International Conference “Coal 2013”, pp. 293-300. Belgrade, Serbia: Yugoslav Opencast Mining Committee.

Struzina M. & Benndorf J. (2011) Efficient planning and modelling for modern dewatering concepts in unconsolidated rock under geological uncertainty. *World of Mining*, 62(2): 66-75.

Struzina M., Müller M., Drebenstedt C., Mansel H. & Jolas P. (2011). Dewatering of Multi-aquifer Unconsolidated Rock Opencast Mines: Alternative Solutions with Horizontal Wells. *Mine Water Environment*, 30: 90-104.

Strzodka K., Fischera M. (1988). Dewatering wells and sealing walls for water control in lignite mines. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 2 (2): 105-107.

Sunila R., Laine E. & Kremenova O. (2004). Fuzzy model and kriging for imprecise soil polygon boundaries. Proceedings of 12th Int. Conf. on Geoinformatics - Geospatial Information Research: Bridging the Pacific and Atlantic, pp. 489-495. Sweden: University of Gävle.

Sugeno M. (1977). Fuzzy measures and fuzzy integral : a survey. In Gupta M.M., Saridis G.N., Gaines B.R. (Ed.), Fuzzy Automata and Decision Processes, 89-102 pp. Amsterdam: North-Holland.

Šubaranović T. & Polomčić D. (2006). Selection of location for dewatering screens construction on Drmno open pit mine. In Pavlović V. (Ed.), Proceedings of the VII International conference Nonmetals 2006, pp. 400-414. Belgrade, Serbia: Yugoslav Opencast Mining Committee.

Šubaranović T. & Jocić B. (2008) The influence of the despatching and monitoring system of drawing water of drainage wells in the dewatering system on the surface exploitation of coal. In Pavlović V. (Ed.), Proceedings of the IV International Conference “Coal 2008”, pp. 533-536. Belgrade, Serbia: Yugoslav Opencast Mining Committee.

Šubaranović T., Pavlović V. & Polomčić D. (2011). Hydrodynamic calculation of the screen section „1” at the opencast coal mine Drmno. In Pavlović V. (Ed.), Proceedings of the V International Conference “Coal 2011“, pp. 355-361. Belgrade, Serbia: Yugoslav Opencast Mining Committee.

Šubaranović T., Pavlović V. & Polomčić D. (2013). Influence on environment of sealing screen at lignite opencast mines. *Metalurgia International* (5): 169-175.

Taboada J., Rivas T., Saavedra A, Ordóñez C., Bastante F., Giráldez E. (2002) Evaluation of the Reserve of a Granite Deposit by Fuzzy Kriging, 33 pp. Vigo: University of Vigo.

Tang Y. & Beynon M.J. (2005). Application and development of a fuzzy analytic hierarchy process within a capital investment study. *Journal of Economics and Management*, 1(2): 207-230.

Tang L.L., Kuo Y.C. & Lee E.S. (2005). A multi-objective model for Taiwan notebook computer distribution problem. In Lan Y.C. (Ed.), *Global integrated supply chain systems*, pp. 171. Hershey, PA, USA: Idea Group Publishing.

Teodorović D. & Kikuchi S. (1991). *Uvod u Teoriju Fuzzy Skupova i Primene u Saobraćaju*, 129 pp. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet.

Tolga E., Demircan M. & Kahraman C. (2005). Operating system selection using fuzzy replacement analysis and analytic hierarchy process. *International Journal of Production Economics*, 97: 89-117.

Tsaur S.H., Chang T.Y. & Yen C.H. (2002). The evaluation of airline service quality by fuzzy MCDM. *Tourism Management*, 23: 107-115.

Tsukamoto Y. (1979) An approach to fuzzy reasoning method, In: Gupta M.M., Ragade & Yager R.R. (Ed.), *Advances in Fuzzy Set Theory and Applications*, 137-149 pp. Amsterdam: Elsevier.

Tuysuz F. & Kahraman C. (2006). Project risk evaluation using a fuzzy analytic hierarchy process: An application to information technology projects. *International Journal of Intelligent Systems*, 21: 229-284.

Van Broekhoven E. (2004). A comparison of three methods for computing the center of gravity defuzzification. *Proceedings of the International Conference on Fuzzy Systems*, 3: 1537-1542.

Van Laarhoven P.J.M. & Pedrcyz W. (1983). A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy Sets and Systems*, 11: 229-241.

Vargas L. (1990). An overview of Hierarchy Process and its applications. *European Journal of Operational Research*, 48(1): 2-8.

Yidana M.S. (2011). Groundwater flow modeling and particle tracking for chemical transport in the southern Voltaian aquifers. *Environmental Earth Science*, 63: 709-721.

Younger P.L. (2007). Groundwater in the environment: an introduction, 336 pp. Oxford: Blackwell.

Younger P.L., Banwart S.A., Hedin R.S. (2002). Mine water: hydrology, pollution, remediation, 442 pp. Dordrecht: Kluwer.

Wang T.C. & Chen Y.H. (2007). Applying consistent fuzzy preference relations to partnership selection. *Omega, the International Journal of Management Science*, 35: 384-388.

Warner J.W., Khazaeib W., Warnerc J., Manghid F., Phranere R.W., Mortazavie B. & Namvarf R. (2009) Flow and transport modelling of a highly stressed aquifer to refine management strategies. *Water International*, 34(2): 264-279.

Woodward J. (2005). An introduction to geotechnical processes, 129 pp. London: Spon Press.

Wu Q., Dong D.L., Shi Z.H., Wu X., Sun W.D., Ye G.J., Li S.W. & Liu J.T (2000). Optimum combination of water drainage, water supply and eco-environment protection in coal-accumulated basin of North China. *Science in China Series D: earth Sciences*, 43(2): 122-133.

Wu Q., Zhou W.F., Li D., Di Z.Q. & Miao Y. (2006). Management of karst water resources in mining area: dewatering in mines and demand for water supply in the Dongshan Mine of Taiyuan, Shanxi Province, North China. *Environmental Geology*, 50(8): 1107-1117.

Wu Q., Hu B.X., Wan L. & Zheng C. (2010). Coal mine water management: optimization models and field application in North China. *Hydrological Sciences Journal*, 55(4): 609-623.

Wyllie D.C., Mah C.W. (2004). Rock slope engineering: civil and mining, 456 pp. NYC: Spon Press.

Zadeh L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3): 338–353.

Zadeh L.A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information sciences*, 8: 199-249.

Zadeh L.A. (1979). A theory of approximate reasoning, *Machine Intelligence*, 9: 149-194.

Zahedi F. (1986). The analytic hierarchy process: A survey of the method and its applications. *Interfaces*, 16(4): 96-108.

Zaidel J., Markham B. & Bleiker D. (2010) Simulating seepage into mine shafts and tunnels with ModFlow. *Ground Water*, 48(3): 1-11.

Zarghami M. & Szidarovszky F. (2011). Multicriteria analysis: applications to water and environment management, 195 pp. Berlin: Springer.

Zhu K., Jing Y. & Chang D. (1999). A discussion on extent analysis method and applications of fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 116: 450-456.

Zimmermann H.J. (2001). Fuzzy sets teory and its applications, 514 pp. Boston-Dordrecht-London: Kluwer Academic Publishing.

BIOGRAFSKI PODACI

Dragoljub Bajić rođen je 27. decembra 1984. godine u Kikindi. Gimnaziju “Dušan Vasiljev”, opšteg smera, završava u Kikindi 2003. god. Oktobra 2003. godine upisuje studije na Rudarsko-geološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, smer: hidrogeologija. Marta 2008. godine postaje dobitnik nagrade za studenta generacije Rudarsko-geološkog fakulteta. Tokom osnovnih akademskih studija (2003-2008. godine) bio je stipendista Ministarstva prosvete i sporta Republike Srbije.

Oktobra 2008. godine upisao je doktorske akademske studije na Rudarsko-geološkom fakultetu u Beogradu na studijskom programu hidrogeologija, naučna oblast: vodosnabdevanje i menadžment podzemnih voda. Za vreme trajanja doktorskih akademskih studija (2009-2011. god.) bio je stipendista Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Učestvovao je na većem broju domaćih i međunarodnih naučnih skupova kao izlagač i kao kopredsedavajući na sesijama. Do sada je publikovao preko trideset naučnih radova, od kojih su dva rada sa „SCI“ liste.

NAUČNI RADOVI

Kategorija M20 - Radovi objavljeni u naučnim časopisima međunarodnog značaja

M21 - Rad u vrhunskom međunarodnom časopisu

Polomčić D., Hajdin B., Stevanović Z., **Bajić D.** & Hajdin K. (2013). Groundwater management by riverbank filtration and an infiltration channel: The case of Obrenovac, Serbia. *Hydrogeology Journal*, 21 (7): 1519-1530. DOI: 10.1007/s10040-013-1025-9

M23 - Rad u međunarodnom časopisu

Polomčić D. & **Bajić D.** (2015). Application of Groundwater modeling for designing a dewatering system: Case study of the Buvač Open Cast Mine, Bosnia and Herzegovina. *Geologia Croatica*, 68(2): DOI: 10.4154/gc.2015.07

M24 - Rad u časopisu međunarodnog značaja verifikovanog posebnom odlukom

Bajić D. & Polomčić D. (2014). Fuzzy optimization in hydrodynamic analysis of groundwater control systems: Case study of the pumping station “Bezdan 1”, Serbia. *Geološki anali Balkanskog poluostrva*, 75: 103-110. DOI: 10.2298/GABP1475103B

Čokorilo Ilić M., Vakanjac Ristić V., Oudech S., Vakanjac B., Polomčić D. & **Bajić D.** (2014). Assessment of the discharge regime and water budget of Belo Vrelo (source of the Tolišnica River, central Serbia). *Geološki anali Balkanskog poluostrva*, 75: 93-101. DOI: 10.2298/GABP1475093C

Kategorija M30 - Zbornici međunarodnih naučnih skupova

M33 - Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini

Bajić D. & Polomčić D. (2008). 3D Hydrogeological model of the limonite ore body “Buvač” (Republika Srpska, Bosnia and Herzegovina). Proceedings of the IV International Conference “Coal 2008”. Belgrade, Serbia, 15-18 October, 2008; Pavlović V, Eds.; Yugoslav Opencast Mining Committee: Belgrade; pp. 1-9

Bajić D., Polomčić D., Papić P. & Stojković J. (2011). Hydrodynamic model of the open-pit mine „Buvač“ (Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina). CD Proceedings of the 6th Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy Water and Environmental Systems, Dubrovnik, Croatia, 25-29 September, 2011; Guzović Z, Eds.; Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture: Zagreb; ID. No: dubrovnik2011_FP_164

Polomčić D. & **Bajić D.** (2011). 3D Hydrodynamic model of open pit mine “Polje E” (Kolubara coal basin). Proceedings of the V International Conference “Coal 2011”, Zlatibor, Serbia, 19-22 October, 2011; Pavlović V, Eds.; Yugoslav Opencast Mining Committee: Belgrade; pp. 320-330

Bajić D. & Polomčić D. (2012). A conceptual hydrogeological model for open pit mine „Polje E“ (Kolubara coal basin, Serbia). Proceedings of the GIS Ostrava 2012 - Surface models for geosciences symposium, Ostrava, Czech Republic, 23-25 January, 2012; Růžička J. and Růžicková K, Eds.; Vysoká škola báňská - Technical University of Ostrava: Ostrava; pp. 1-12

Polomčić D., **Bajić D.** & Ristić-Vakanjac V. (2012). Groundwater balance, natural recharge and drainage zones at open pit mine „Polje E“ of Kolubara Coal Basin (Republic of Serbia). CD Proceedings of the 7th Conference on Sustainable Development of Energy Water and Environmental Systems, Ohrid, Republic of Macedonia, 01-07 July, 2012; Ban M., Duić N., Guzović Z., Klemeš J. J., Markovska N., Schneider D. R. and Varbanov P., Eds.; Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture: Zagreb, 2012; ID No. SDEWES2012_FP_80

Polomčić D., **Bajić D.**, Matić I. & Zarić J. (2013). Hydrodynamic characteristics of water supply source of Kikinda (Serbia). Digital Proceedings of the the 8th Conference on Sustainable Development of Energy Water and Environmental Systems, Dubrovnik, Croatia, 22-27 September, 2013; Ban M., Duić N., Guzović Z., Klemeš J. J., Markovska N., Schneider D. R. and Varbanov P., Eds.; Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture: Zagreb; SDEWES13_FP_482., pp. 1-14

Zarić J., **Bajić D.**, Polomčić D. & Petronijević N. (2013). Enhanced Anaerobic Bioremediation Using Emulsified Vegetable Oils. Digital Proceedings of the the 8th Conference on Sustainable Development of Energy Water and Environmental Systems, Dubrovnik, Croatia, 22-27 September, 2013; Ban M., Duić N., Guzović Z., Klemeš J. J., Markovska N., Schneider D. R. and Varbanov P., Eds.; Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture: Zagreb; SDEWES13_FP_796., pp. 1-7

Polomčić D., Pavlović V., **Bajić D.** & Šubaranović T. (2013). Multiannual effects of Peštan source operation in the function of predewatering the future Kolubara basin opencast mines. Proceedings of the VI International Conference “Coal 2013”, Zlatibor, Serbia, 02-05 October, 2013; Pavlović V, Eds.; Yugoslav Opencast Mining Committee: Belgrade; pp. 259-266

Bajić D., Polomčić D. & Jemcov I. (2014). The purpose of fuzzy logic in hydrogeological practice. Proceedings of the XVI Serbian Geological Congress, Donji Milanovac, Serbia, 22-25 May 2014; Cvetković V., Eds.; Serbian Geological Society: Belgrade, Serbia, 2014; pp. 424-429

Čokorilo Ilić M., Vakanjac Ristić V., Oudeh S., Polomčić D. & **Bajić D.** (2014). Hydrogeological characteristics and discharge regime of White spring (source of the Tolosnica river, Serbia), Proceedings of the XVI Serbian Geological Congress, Donji Milanovac, Serbia, 22-25 May, 2014; Cvetković V., Eds.; Serbian Geological Society: Belgrade, Serbia, 2014; pp. 346-352

Polomčić D., **Bajić D.** & Ilić Z. (2014). Implementation of alternative forecasting hydrodynamic during designing of mines defense system against groundwater on opencast mine field C example. Proceedings of the 11th International Opencast Mining Conference, Zlatibor, Serbia, 15-18 October 2014; Pavlović V., Eds.; Yugoslav Opencast Mining Committee: Belgrade; pp. 321-338

Kategorija M40 - Nacionalne monografije, tematski zbornici, leksikografske i kartografske publikacije nacionalnog značaja; naučni prevodi i kritička izdanja građe, bibliografske publikacije

M45 - Poglavlje u knjizi M42 ili rad u tematskom zborniku nacionalnog značaja

Polomčić D., Stevanović Z., Dokmanović P., Papić P., Ristić-Vakanjac V., Hajdin B., Milovanović S. & **Bajić D.** (2011). Vodosnabdevanje podzemnim vodama u Srbiji -

stanje i perspektive. *Naših 40 godina*. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet: Beograd; pp. 45-78.

Kategorija M50 - Časopisi nacionalnog značaja

M51 - Rad u vodećem časopisu nacionalnog značaja

Polomčić D., **Bajić D.** & Krunic O. (2014). Hidrodinamička analiza interakcije dva izvorišta u radu na primeru vodosnabdevanja Bečeja (Hydrodynamic analysis of the interaction of two operating groundwater source, case study: groundwater supply of Bečej). *Tehnika*, 69(4): 597-603

Polomčić D. & **Bajić D.** (2014). Primena hidrodinamičkih prognoznih proračuna na primeru crpne stanice „Bezdan 1“ (Application of the hydrodynamic predictive modeling on the example of the pumping station „Bezdan 1“). *Tehnika*, 69(6): 956-962

M52 - Rad u časopisu nacionalnog značaja

Polomčić D., Stevanović Z., **Bajić D.**, Hajdin B., Ristić-Vakanjac V., Dokmanović P. & Milanović S. (2012). Vodosnabdevanje i održivo upravljanje podzemnim vodnim resursima u Srbiji. *Vodoprivreda*, 258-260: 225-231

Polomčić D., **Bajić D.**, Papić P. & Stojković J. (2013). Hydrodynamic model of the open-pit mine “Buvač” (Republic of Srpska). *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 1(3): 260-271. DOI: 10.13044/j.sdewes.2013.01.0019

Polomčić D., **Bajić D.**, Ristić-Vakanjac V., Čokorilo M., Drašković D. & Špadijer S. (2013). Hidrodinamičke karakteristike izvorišta „Peštan“ za vodosnabdevanje Lazarevca. *Vodoprivreda*, 261-263: 55-68

Ristić-Vakanjac V., Stevanović Z., Polomčić D., Blagojević B., Čokorilo M. & **Bajić D.** (2013). Određivanje dinamičke zapremine i bilans karstnih izdanskih voda Velikog vrela (Južna Beljanica). *Vodoprivreda*, 261-263: 97-110

Polomčić D., **Bajić D.** & Zarić J. (2015). Determining the Groundwater Balance and Radius of Influence Using Hydrodynamic Modeling: Case Study of the Groundwater Source Šumice in Serbia. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 3(3): 217-229. DOI: 10.13044/j.sdewes.2015.03.0017

M53 - Rad u naučnom časopisu

Bajić D., Polomčić D., Ristić-Vakanjac V. & Čokorilo M. (2013). Groundwater balance at open pit mine „Buvač“ (Republic of Srpska). *Zapisnici Srpskog Geološkog Društva*, pp. 69-80

Polomčić D., **Bajić D.**, Ristić-Vakanjac V. & Čokorilo Ilić M. (2014). Automatic calibration of hydrodynamic models using PEST program. *Zapisnici Srpskog Geološkog Društva*, pp.13-27

Polomčić D., **Bajić D.** & Čokorilo Ilić M. (2014). Modflow at the crossroad, *Zapisnici Srpskog Geološkog Društva*, pp. 173-186

Bajić D., Zarić J., Ristić-Vakanjac V., Polomčić D. & Čokorilo Ilić M. (2014). The city of Ohrid and report on the International conference „SDEWES“ and „BALWOIS“. *Zapisnici Srpskog Geološkog Društva*, pp. 245-255

Čokorilo Ilić M., **Bajić D.**, Ristić Vakanjac V., Polomčić D. & Vakanjac B. (2014) Tripoint lakes Ohrid and Prespa. *Zapisnici Srpskog Geološkog Društva*, pp. 197-204

Polomčić D., Ristić Vakanjac V., **Bajić D.** & Čokorilo Ilić M. (2014). Simulacija režima karstne izdani primenom 3D hidrodinamičkog modela na primeru Pirotske kotline i karstnog masiva Stare planine. *Pirotski zbornik*, 51-70

Kategorija M60 - Zbornici skupova nacionalnog značaja

M63 - Saopštenje sa skupa nacionalnog značaja štampano u celini

Polomčić D., Stevanović Z., Dokmanović P., Ristić-Vakanjac V., Hajdin D., Milanović S. & **Bajić D.** (2012). Optimization of groundwater supply in Serbia. Proceedings of the XIV Serbian Symposium on Hydrogeology, Zlatibor, Serbia, 17-20 May, 2012; Savić N. and Jovanović M, Eds.; University of Belgrade - Faculty of mining and geology: Belgrade; pp. 15-20

Hajdin B., Polomčić D., Stevanović Z., **Bajić D.** and Hajdin K. (2012). Asseings prospect of groundwater source „Vić Bare“ for Obrenovac’s water supply. Proceedings of the XIV Serbian Symposium on Hydrogeology, Zlatibor, Serbia, 17-20 May, 2012; Savić N. and Jovanović M, Eds.; University of Belgrade - Faculty of mining and geology: Belgrade, pp. 107-111

Prilog 1.

Izjava o autorstvu

Potpisani: **Dragoljub Bajić**

broj indeksa: **G-804/08**

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

**Fazi optimizacija u hidrodinamičkoj analizi za potrebe projektovanja sistema
odbrane od podzemnih voda**

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis doktoranda

U Beogradu, 30.09.2015. god.



Prilog 2.

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora: **Dragoljub Bajić**

Broj indeksa: **G-804/08**

Studijski program: **Hidrogeologija**

Naslov rada: **Fazi optimizacija u hidrodinamičkoj analizi za potrebe projektovanja sistema odbrane od podzemnih voda**

Mentor: **Prof. dr Dušan Polomčić i Prof. dr Igor Jemcov**

Potpisani: **Dragoljub Bajić**

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis doktoranda

U Beogradu, 30.09.2015. god.



Prilog 3.

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

Fazi optimizacija u hidrodinamičkoj analizi za potrebe projektovanja sistema odbrane od podzemnih voda

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo
2. Autorstvo - nekomercijalno
- ☒ 3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poledini lista).

Potpis doktoranda

U Beogradu, 30.09.2015. god.



1. Autorstvo - Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. Autorstvo – nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. Autorstvo - nekomercijalno – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. Autorstvo - nekomercijalno – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. Autorstvo – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. Autorstvo - deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.