IZBOR KOMPATIBILNIH INFORMACIJA ZA ODREĐIVANJE HIDRODINAMIČKIH KARAKTERISTIKA TRANSPORTA VODE I TRASERA U KRAŠKOM AKVIFERU

Mr Ivan BAGARIĆ, Zavod za hidrotehniku Građevinskog fakulteta, Sarajevo

K r a t a k s a d r ž a j

U radu je izložena analiza i izvršen izbor podataka koje je potrebno prikupljati u toku trasiranja strujanja podzemne vode u kraškim akviferima u zavisnosti od stepena do kojeg se želi upoznati transport podzemne vode i trasera * kroz kraški akvifer, što je naravno u vezi sa raspoloživim sredstvima za istraživanja.

U V O D

Najefikasnije i najbolje upoznavanje nekog složenog sistema vrši se kroz modeliranje tog sistema. Modeliranje se može izvršiti na fizičkom, analognom i matematičkom modelu.

Neposredni cilj modeliranja sistema je:

- određivanje karakteristika sistema;
- upoznavanje procesa koji se odvija u sistemu i procesa koji bi se mogli odvijati u sistemu

U slučaju kada se kao sistem posmatra kraški akvifer i kada se kao proces koji se odvija u sistemu posmatra transportovanje i akumuliranje podzemne vode i u vodi sadržane supstance, parametri koje treba najprije odrediti u cilju odgovarajućeg vodoprivrednog iskorištenja tog kraškog akvifera su:

- sposobnost akumuliranja vode po prostoru kraškog akvifera;
- sposobnost transportovanja vode po prostoru kraškog akvifera;
- sposobnost akumuliranja trasera po prostoru kraškog akvifera;
- karakteristike transportovanja trasera po prostoru kraškog akvifera;
- karakteristike transformacije trasera po prostoru kaškog akvifera u uslovima strujanja trasera
- odnosno, karakteristike sistema.

Nakon određivanja krakteristika sistema otvara se mogućnost da se odre-

* Traserom se ovdje naziva supstanca sadržana u vodi za koju je potrebno odrediti karakteristike transportovanja kroz kraški akvifer

de i krakteristike odvijanja procesa transportovanja vode i trasera kroz kraški akvifer za proizvoljne konturne uslove (uslove ispuštanja trasera i hidrometeorološke uslove).

Da bi se pomoću modela mogle odrediti karakteristike sistema neophodno je posmatrati proces koji se odvija u realnom sistemu i prikupiti one podatke o tome procesu koji omogućavaju da se pomoću njih odrede karakteristike sistema. Takvi podaci se ovdje nazivaju kompatibilnim podacima za određivanje karakteristika sistema.

Svrha ovog rada je upravo da ukaže na te kompatibilne podatke čije poznavanje omogućuje određivanje hidrodinamičkih karakteristika kraškog akvifera.

NAČIN FORMIRANJA MODELA TRANSPORTA PODZEMNE VODE I TRASERA KROZ KRAŠKI AKVIFER

Logička osnova za formiranje bilo kakvog modela su jednačine bilansa.

U slučaju modeliranja transporta podzemne vode i transporta trasera kroz kraški akvifer to su jednačine bilansa mase vode, bilansa mase trasera, bilansa količine kretanja mase vode i bilansa količine kretanja mase vode u kojoj se nalazi i traser (masa trasera se ovdje zanemaruje).

Svaki od ovih bilansa može biti integralni, za čitav kraški akvifer, i parcijalni, ako se bilans pravi posebno za svaki diskretni dio kraškog akvifera.

Integralni bilans odgovara pretpostavci da je prostor kraškog akvifera homogen po svim karakteristikama i pretstavljen jednom ćelijom što je samo gruba aproksimacija stvarnog stanja, a u literaturi je poznat po imenom »Blac box« metod. Parcijalni bilans se pravi na prostornim elementima kraškog akvifera koji treba da budu toliko maleni da prosječne vrijednosti karakteristika kraškog akvifera u ovim elementima približno odgovaraju stvarnim vrijednostima tih karakteristika u pojedinim tačkama tih elemenata.

Što je diskretizacija prostora finija, pojava koja se odvija u kraškom akviferu, bolje je predstavljena bilansima u svim elementima kraškog akvifera.

Sadržaj i način formiranja bilansnih jednačina kao i način formiranja transportnih jednačina (kombiniranjem bilansnih jednačina) koje opisuje transport podzemne vode i transport trasera kroz kraški akvifer i koje predstavljaju matematički model transporta podzemne vode i matematički model transporta trasera kroz kraški akvifer, detaljnije su obrađene u (7) gdje su transportne jednačine date u obliku diferencijalnih jednačina.

Određivanje hidrodinamičkih karakteristika kraškog akvifera vrši se rješavanjem transportnih diferencijalnih jednačina polazeći od pretpostavljenih karakteristika kraškog akvifera.

Iterativnim poboljšavanjem pretpostavljenih karakteristika kraškog akvifera na bazi kriterija optimalne simulacije registrovanog ponašanja kraškog akvifera u periodu njegovog posmatranja, dobijaju se vrijednosti navedenih hidrodinamičkih karakteristika kraškog akvifera.

To znači da je u cilju određivanja hidrodinamičkih karakteristika kraškog akvifera neophodno prikupljati upravo one podatke koji su neophodni za rješavanje transportne jednačine koja opisuje transport podzemne vode i transportne jednačine koja opisuje transport trasera kroz kraški akvifer. Pregled ovih podataka dat je na kraju rada.

Tačnost određivanja karakteristika sistema, odnosno u ovom slučaju hidrodinamičkih karakteristika kraškog akvifera, zavisi od količine kompatibilne informacije koja se prikupi u periodu posmatranja procesa koji se odvija u realnom sistemu.

Količina kompatibilne informacije je sve veća što je prostorno rastojanje između tačaka u kojima se prikuplja informacija manje, što je period kontinuiranog prikupljanja informacije duži, što je homogenost i stacionarnost prikupljanja informacije duži, što je hemogenost i stacionarnost prikupljane informacije manja i što je hemogenost i stacionarnost karakteristika sistema koje se trebaju odrediti veća.

Za praktične inženjerske potrebe tačnost određivanja krakteristika sistema je ograničena povećanjem dobiti radi tačnijeg poznavanja sistema.

Radi toga se upoznavanje procesa transporta podzemne vode i trasera u kraškim akviferima najčešće vrši iterativno, odnosno najprije sa malim brojem tačaka u kojima se prikuplja informacija uz mali obim mjerenja, da bi se kasnije kada se dokaže racionalnost ulaganja većih sredstava da bi se tačnije odredio sistem, prikupljanje podatka vršilo u većem broju tačaka, u toku dužeg intervala vremena (ili u toku više kraćih intervala vremena) i uz korištenje većeg broja bilansnih jednačina.

SPECIFIČNE OSOBINE KRAŠKIH AKVIFERA I TRANSPORTA PODZEMNE VODE KROZ KRAŠKI AKVIFER

Rješenje parcijalnih diferencijalnih jednačina koje opisuju transport podzemne vode i transport trasera kroz kraški akvifer u općem slučaju za trodimenzionalno strujanje i uz pretpostavku nehomogenosti i nestracionarnosti svih hidrodinamičkih karakteristika kraškog akvifera, bilo bi vrlo složeno.

Radi toga je vrlo korisno pri modeliranju modela jednog sistema sagledati njegove osnovne karakteristike i u skladu sa mogućnostima izvršiti pojednostavljenje modela uz koja će se ipak dobijati dovoljno tačni rezultati.

Kraški akviferi imaju određene specifične karakteristike koje dozvoljavaju određena pojednostavljenja i one će biti istaknute u daljem tekstu.



Sl.1. Vertikalni presjek kroz kraški akvifer Igman-Bjelašnica bez vertikalne distorzije

Kraški akviferi se prostiru na velikim površinama i njihove horizontalne dimenzije su znatno veće od njihove debljine (H≫10 V) pa se uz relativno malu grešku trodimenzionalno strujanje može zamjeniti približno ravanskim strujanjem što podrazumjeva pretpostavku da su brzine strujanja vode u kraškom akviferu jednake njihovoj horizontalnoj projekciji pri čemu debljina provodne sredine kroz koju voda struji može da bude različita u različitim takama akvifera. To odgovara poznatoj Dipuitovoj pretpostavci.

Kraški akviferi su relativno duboki (nekoliko stotina metara) i rastojanje od površine terena do površine podzemne vode je vrlo veliko pa iz ekonomskih razloga nije moguće određivati položaj slobodne površine podzemne vode sistemom prijezometara kao što je to uobičajeno u granularnim akviferima.

Radi toga je potrebno da se rješavanje diferencijalne jednačine transporta podzemne vode, izvrši pod pretpostavkom da položaj slobodne površine podzemne vode nije poznat što je različito od klasičnog pristupa rješavanju diferencijalne jednačine transporta podzemne vode za granularne akvifere u cilju određivanja hidrodinamičkih karakteristika akvifera.

Nepoznavanje početne raspodjele potencijala znatno otežava rješenje diferencijalne jednačine jer je potrebno prilikom svakog rješavanja diferencijalne jednačine odrediti početni položaj slobodne površine podzemne vode. Ovo određivanje početnog položaja nivoa podzemne vode (početnog uslova) može se izvršiti korištenjem činjenice da je kraški akvifer sistem sa ograničenom memorijom i uz dodatnu informaciju o ponašanju sistema u toku dužeg perioda vremena.

Ako u prostoru kraškog akvifera postoji jedan ili više pijezometara obavezno ih treba osmatrati jer oni pružaju vrlo vrijednu informaciju koja se može iskoristiti za određivanje hidrodinamičkih karakteristika kraškog akvifera uz pomoć istog modela.

Površina terena u kraškim akviferima ima obično izrazito dobre infiltracione karakteristike pa se nakon padavina veliki procenat vode sa površine terena kraškog akvifera (70-90%) lako infiltrira u podzemlje.

U podzemlju kraškog akvifera voda se kreće kroz pukotine, nastale usljed tektonskih poremećaja i šupljine, nastale karstirikacijom koje imaju izrazito dobre transportne karakteristike i učestuvju u ukupnom transportu vode kroz kraški akvifer sa više od 90%. Istovremeno akumulacione karakterisike ovih pukotina i šupljina su relativno malene i predstavljaju orijentaciono manje od 10% akumulacione sposobnosti kraškog akvifera (6).

Između pukotina i šupljina sa izrazito dobrim transportnim karakteristikama nalazi se osnovni materijal kraškog akvifera sa primarnom poroznošću materijala kraškog akvifera koji raspolaže sa najvećim dijelom zapremine u kojoj se može akumulirati podzemna voda.

Transportne karakteristike ovog dijela kraškog akvifera znatno su slabije od prosječnih transportnih karakteristika čitavog kraškog akvifera.

Ovakav odnos akumulacionih i transportnih karakteristika u kraškom akviferu je uzrok da se oticanje vode iz kraškog akvifera nakon padavina odvija na slijedeći način:

Padavine (izuzev sniježnih) se na površini terena direktno ili nakon kraćeg površinskog toka infiltriraju u kraški akvifer. Vertikalno strujanje podzemne vode od površine terena do slobodne površine podzemne vode je relativno brzo radi velikog poprečnog presjeka kroz koji se voda transportuje i velikog gradijenta potencijala. Pristigla voda brzo ispunjava pukotine i šupljine (nivo podzemne vode naglo raste) velike transportne sposobnosti, čija je zapremina relativno malena, a zatim postepeno počinje ispunjavati i slobodni prostor primarne pozornosti

Porastom nivoa podzemne vode u akviferu raste i razlika između nivoa vode u podzemlju i nivoa vode na izvoru pa se radi toga proticaj vode na izvoru naglo povećava.

Nakon prestanka padavina šupljine i pukotine sa relativno velikom transportnom sposobnošću relativno brzo se prazne, djelomično na račun napajanja dijela kraškog akvifera sa primarnom poroznošću, a dijelom na račun oticanja iz kraškog akvifera kroz pukotine i šupljine velike transportne sposobnosti.

U ovom periodu na veličinu proticaja na vrelima koja se napajaju iz kraškog akvifera dominantan uticaj imaju transportne karakteristike pukotina i šupljina velike transportne sposobnosti.

Kada se šupljine sa velikom transportnom sposobnošću većim dijelom isprazne nivo vode u šupljinama postaje niži od nivoa vode u poroznoj sredini sa primarnom poroznosti pa tada počinje postepeno pražnjenje sredine sa primarnom poroznosti. U tom periodu transportne karakteristike šupljina primarne poroznosti imaju dominantan uticaj na količinu vode koja u tom periodu ističe iz kraškog akvifera. Velike šupljine u ovom periodu imaju ulogu drenažnog sistema koji odvodi vodu iz kraškog akvifera uz relativno mali gubitak energije.

Karakter oticanja vode u ova dva perioda je različit i ako se žele na modelu simulirati efekti i jednog i drugog režima oticanja neophodno je uvesti vrlo finu diskretizaciju prostora ili da bi se izbjegla vrlo fina diskretizacija prostora može se formirati »double porsity« model (model sa dvostrukom poroznosti).

Ako se akumulacione i transportne sposobnosti prosječnog »malog« i »velikog« elementa kraškog akvifera mnogo ne razlikuju efekti dva navedena režima oticanja neće se mnogo razlikovati od efekata dobivenih sa modela sa jedno-

strukom poroznošću (single porosity model) koji se upotrebljava za modeliranje klasične porozne sredine.

Svrha ovog razmatranja karakteristika kraškog akvifera je uočavanje vrste modela koji treba primijeniti pri određivanju akumulacionih i transportnih karakteristika kraškog akvifera da se ne bi radi nesagledavanja »efekta razmjere« (2) pogrešno simulirao transport podzemne vode i trasera kroz kraški akvifer.

Nakon ovog razmatranja također, lakše je uočiti kakav uticaj može imati strujanje podzemne vode u različitim fazama na transport trasera i kakvi se efekti u vezi s tim mogu pojaviti.

Strujanje kroz pukotine i šupljine velike transportne sposobnosti u periodu pražnjenja tih šupljina a i kasnije vjerovatno je turbulentno jer je kod niza trasiranja registrovana srednja brzina transporta trasera od jedan i više centimetara u sekundi (1) pa već pri dijametru šupljine većem od oko 10 cm Rejnoldsov broj prelazi kritični i javlja se turbulentno strujanje.

Turbulentno strujanje se javlja u kraškom akviferu u blizini vrela gdje je koncentracija toka podzemne vode jače izražena što je potvrđena mjerenjima obrađenim u (4) i (5).

Standardni matematički modeli su rađeni za granularnu poroznu sredinu gdje se uglavnom javlja laminarno strujanje pa je korisno razmotriti u kom slučaju se ti modeli mogu primijeniti na modeliranje transporta podzemne vode u kraškim akviferima i u slučaju kada se u značajnom dijelu akvifera javlja turbulentno strujanje.

Turbulentno strujanje u kraškom akviferu postoji a naročito u periodu pražnjenja pukotina i šupljina sa velikom transportnom sposobnošću. S druge strane upoređivanjem vremena trajanja transporta trasera u kraškom akviferu u recesionom periodu i trajanja potpunog pražnjenja dinamičkog dijela kraške podzemne akumulacije može se uočiti da je trajanje pražnjenja dinamičke podzemne akumulacije mnogo duže od trajanja transporta trasera. Ta činjenica ukazuje da pored relativno brzog transporta vode kroz pukotine i šupljine velike transportne sposobnosti postoji i relativno spori transport iz pora primarne poroznosti.

Ovaj »spori« transport vjerovatno se odvija u laminarnom režimu i vjerovatno zahvata najveći dio zapremine kraškog akvifera u toku najdužeg perioda vremena.

Radi toga vjerujem da ima smisla simulaciju strujanja u kraškom akviferu i određivanje akumulacionih i transportnih karakteristika kraškog akvifera početi na standardnim matematičkim modelima kod kojih je bilans količine kretanja mase vode napravljen pod pretpostavkom nevrtložnog, laminarnog strujanja.

Određujući akumulacione transportne karakteristike kraškog akvifera, uz kriterij optimalne simulacije dinamike sistema u periodu njegovog praćenja, u tačkama kraškog akvifera gdje se stvarno javlja turbulentno strujanje dobiti će se (ukoliko se raspolaže sa dovoljnom količinom informacije) transportne karakteristike kraškog akvifera koje će biti zavisne od momentalnog proticaja podzemne vode kroz te tačke.

Ako je uzrok ovoj promjenljivosti transportnih karakteristika samo razlika u pretpostavljenom i stvarnom režimu strujanja onda će te zavisnosti imati oblik

$$T_1 = T_0\left(\frac{V_0}{V_1}\right) = T_0\left(\frac{q_0}{q_1}\right) \qquad (1)$$

koja se dobije izjednačavanjem pada linije energije u tačkama kraškog akvifera pri primjeni linearnog i kvadratnog zakona otpora IT = IL), i upoređenja provodljivosti u istoj tački za nepromjenjenu geometriju strujanja a uz promjenjen režim strujanja.

$$I^T = \frac{\Delta h}{\Delta L} = \zeta \cdot \Delta L \cdot \frac{V^2}{2g} \quad I_L = \frac{V}{K} = \frac{V \cdot d}{T} \qquad (2)$$

U tačkama modela kraškog akvifera u kojima se uoči navedena promjenljivost transportnih karakteristika treba pokušati postići bolju simulaciju ponašanja sistema u periodu njegovog praćenja korigujući transportne karakteristike u tim tačkama u zavisnosti od veličine brzine ili veličine proticaja kroz odgovarajuće presjeke prema jednačini (1).

Prethodno razmatranje uz sagledavanje razvijenosti metoda za rješavanje diferencijalne jednačine transporta, sugerira da se u prvoj fazi simulacije transporta podzemne vode koristi prilagođeni model sa jednostrukom poroznošću i sa linearnim zakonom otpora.

Ako se polaže sa dovoljnom količinom informacije koja može izdiferencirati efekte različitih režima oticanja treba predhodni model proširiti na model sa »dvostrukom poroznosti« a ako se sa raspoloživom informacijom mogu izdiferencirati i efekti strujanja sa linearnim i kvadratnim zakonom otpora onda na formiranom modelu može se izvršiti optimiziranje simuliranja dinamike sistema u periodu njegovog praćenja predloženim korigovanjem transportnih karakteristika u tačkama u kojima za to postoji indikacija.

Pregled kompatibilnih parametara koje je potrebno prikupljati prilikom trasiranja strujanja u kraškom akviferu u cilju njihovog iskorištenja za određivanje hidrodinamičkih karakteristika kraškog akvifera.

Nakon izvršenog pregleda karakteristika kraškog akvifera, specifičnosti modeliranja transporta podzemne vode i trasera kroz kraški akvifer i vrlo kratkog opisa metode određivanja hidrodinamičkih karakteristika kraškog akvifera nabrojati će se uslovi koje je potrebno zadovoljiti da bi se navedene transportne jednačine mogle riješiti, što će ujedno predstavljati i pregled kompatibilnih podataka koje je nophodno prikupljati u toku trasiranja da bi se mogle odrediti hidrodinamičke karakteristike kraškog akvifera korištenjem jednačina bilansa.

Bilans mase trasera zahtjeva registrovanje:

– ukupne mase trasera koja je ubačena u vodu na mjestu trasiranja;

– ukupne mase trase koja je izišla na svim vrelima koja dreniraju istraživani akvifer.

Ako je trasiranje vršeno traserima sa značajnim akumuliranjem ili sa značajnom transformacijom u toku transporta kroz kraški akvifer gornjim podacima neophodno je pridodati i uslovne jednačine koje određuju intenzitet akumuliranja – evakuacije i intenzitet transformacije trasera.

Prosječna brzina transporta trasera koje je kod svih dosadašnjih trasiranja registrovana predstavlja integralni parametar transportne jednačine koja opisuje transport vode i jednačine bilansa količine kretanja mase vode koja sadrži traser.

Prosječna brzina transporta trasera zavisi od akumulacionih i transportnih svojstava određenog kraškog akvifera pa u tom smislu samo orijentaciono predstavlja akumulacione i transportne karakteristike kraškog akvifera.

Bilans količine kretanja mase vode u kojoj se nalazi traser određen je sa parametrima bilansa količine kretanja mase ukupne podzemne vode u akviferu i podacima koji opisuju raspored mase trasera u prostoru i vremenu u toku ispuštanja trasera i u toku registrovanja trasera na vrelima a to su:

– vremenska zavisnost ispuštanja mase trasera na mjestu trasiranja;

– vremenska zavisnost proticanja mase trasera na svim vrelima koja dreniraju akvifer.

Bilans mase podzemne vode je određen poznavanjem svih ulaza vode u kraški akvifer i svih izlaza vode iz kraškog akvifera. Ovim se pretpostavja poznavanje konture akvifera, koja se određuje ili trasiranjem ili nekim drugim metodama:

– ulaz vode u kraški akvifer su padavine koje se infiltriraju kroz površinu terena a registruju se na hidrometeorološkim stanicama. Da li se raspolaže sa dovoljnom količinom informacije za određivanje hidrodinamičkih karakteristika kraškog akvifera zavisiti će mnogo od toga kako je sa raspoloživim hidrome-

teorološkim stanicama na području akvifera predstavljena nehomogenost i nestacionarnost padavina odnosno od izvršene diskretizacije prostora po promjenljivoj »padavine«. Padavine sa kojima se ulazi u model su redukovane tako da je volumen ulaza i volumen izlaza vode u toku dužeg vremenskog perioda isti.

Ima još nekoliko uticaja koji otežavaju ili smanjuju tačnost registrovanja ulaznog proticaja kao transformacija intenziteta ulaznog proticaja pri strujanju od površine terena do slobodne površine podzemne vode, zavisnost gubitka vode od drugih hidro-meteoroloških parametara, osrednjavanje padavina na period od jednog dana i slično;

– izlaz vode iz kraškog akvifera na svim vrelima koja dreniraju kraški akvifer. Mjerenje proticaja na većim vrelima vrši hidrometeorološka služba a manja vrela se mogu procijeniti kao dio proticaja većih vrela i tako uzeti u obzir.

Blans količine kretanja mase podzemne vode je određen poznavanjem veličine potencijala strujanja na konturi kraškog akvifera odnosno odgovarajući podaci koje je potrebno prikupiti su:

– kote nivoa vode na svim vrelima koja dreniraju kraški akvifer.

Dodatna informacija koja može upotpuniti nedostatak druge vrste informacije ili nedovoljnu tačnost (npr. registrovanih padavina), je informacija o nivou podzemne vode koji se može registrovati na prijezometrima ukoliko postoje u kraškom akviferu.

Da bi se određivanje akumulacionih i transportnih karakteristika kraškog akvifera rješavanjem navedenih transportnih jednačina izvršilo jednostavnije, niz korisnih informacija za formiranje modela mogu da pruže hidrogeolozi a to su prvenstveno:

– podaci o položaju vodonepropusnih stjena u kraškim akviferima;
– podaci o položaju vodonepropusne padine;
– podaci o položaju rasjeda, lomova i sl.;
– podaci o izmjerenom VDP;
– podaci o otvorenosti površine kraškog akvifera (sposobnost infiltriranja padavina).

Svi ovi podaci ne moraju biti potpuno tačni jer će se na modelu provjeriti ali svi zajedno čine jednu polaznu osnovu za modeliranje transporta vode i trasera kroz kraški akvifer koja omogućava brži put do konačnog rezultata.

LITERATURA

(1) V. B. GEORGIJEVSKIJ: Unificirovanije Algoritmi dlja Opredeljenia Filjtracionih Parametrov, Naukova Dumka, Kijev 1971.

(2) BORELI M.: Efekat razmjere u poroznim sredinama.

(3) JOVIĆ V.: Opći principi matematičkog modeliranja hidrohidrodinamičkih procesa.

(4) HAJDIN G. I IVETIĆ M.: Jedan primjer pokušaja objašnjenja hidrauličkih uslova u kraškom podzemnom toku na osnovu opažanja pijezometarskih stanja i izlaznih proticaja Naš krš broj 4.

(5) AVDAGIĆ I.: Određivanje proticaja u potopljenim kraškim poljima mjerenjem nivoa vode u pijezometrima i akumulaciji – referat na Jugoslovensko-američkom simpozijumu »Vodno bogatstvo i hidrologija krša«, Dubrovnik, juna 1975.

(6) T. D. STRELTSOVA: Hydrodinamic of Ground water Flow in a Fractured Formation, Water Resources Research, VOL. 12. No. 3, June 1976.

(7) BAGARIĆ I.: Trasiranje strujanja podzemne vode u kraškim akviferima Naš krš broj 5.

(8) BAGARIĆ I.: Određivanje akumulacionih i transportnih karakteristika kraških akvifera (disertacija, neobjavljeno)