

Određivanje hidrodinamičkih zona

Zoran Nakić

Ključne riječi

podzemna voda, faktorska analiza, hidrodinamička zona, nivogram, prihranjivanje vodonosnika, zagrebački vodonosni sustav

Key words

ground water, factorial analysis, hydrodynamic zone, hydrograph, recharge of water bearing strata, Zagreb water bearing system

Mots clés

eau souterraine, analyse factorielle, zone hydrodynamique, hydrographe, recharge de la nappe aquifère, système aquifère de Zagreb

Ключевые слова

подземная вода, факторный анализ, гидродинамическая зона, уровеннеграм, подпитывание водоносного слоя, загребская водоносная система

Schlüsselworte

Grundwasser, Faktoranalyse, hydrodynamische Zone, Niveaugramm, Zufluss zum wasserführenden System, wasserführendes System von Zagreb

Z. Nakić

Izvorni znanstveni rad

Određivanje hidrodinamičkih zona

U radu je opisano određivanje hidrodinamičkih zona faktorskom analizom glavnih komponenata. Na primjeru zagrebačkog vodonosnog sustava, identificirane su tri glavne hidrodinamičke zone i nekoliko manjih, koje su odraz prvenstveno lokalnih uvjeta prihranjivanja. Prva se zona nalazi u području budućeg crpilišta Črnkovec, druga u rubnim dijelovima vodonosnog sustava, a treća u uskom pojasu uz rijeku Savu. Utvrđen je značajan utjecaj rijeke na prihranjivanje vodonosnih slojeva.

Z. Nakić

Original scientific paper

Determination of hydrodynamic zones

The determination of hydrodynamic zones through factorial analysis of principal components is described in the paper. Three main and several smaller hydrodynamic zones, which are primarily representative of local recharge conditions, have been identified using the Zagreb water bearing system as an example. The first zone is located within the area of the future well field in Čulinec, the second lies in boundary areas of the water bearing system, and the third zone is situated in the narrow belt along the Sava river. It was established that the influence of the river on the recharge of water bearing strata is quite considerable.

Z. Nakić

Ouvrage scientifique original

Détermination des zones hydrodynamiques

La détermination des zones hydrodynamiques à travers l'analyse factorielle des composantes principales est décrite dans l'ouvrage. Trois zones principales et quelques autres zones de moindre taille, fortement représentatives des conditions locales de recharge, ont été identifiées en utilisant le système aquifère de Zagreb comme exemple. La première zone est située dans l'emprise du futur champ de captage de Čulinec, la deuxième est située dans les sites périphériques de la nappe aquifère, et la troisième zone se trouve dans le corridor étroit le long de la rivière Sava. Il est constaté que l'influence exercé par cette rivière sur la recharge de la nappe aquifère est tout-à-fait considérable.

З. Накич

Оригинальная научная работа

Определение гидродинамических зон

В работе описано определение гидродинамических зон факторным анализом главных компонент. На примере загребской водоносной системы, идентифицированы три главные гидродинамические зоны и несколько меньших, являющихся отражением, в первую очередь, местных условий подпитывания. Первая зона находится в районе будущей насосной станции Чrnkovec, вторая в крайних частях водоносной системы, а третья в узком поясе вдоль реки Савы. Установлено значительное влияние реки на подпитку водоносных слоёв.

Z. Nakić

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Bestimmung hydrodynamischer Zonen

Im Artikel beschreibt man die Bestimmung hydrodynamischer Zonen mittels der Faktoranalyse der Hauptkomponenten. Am Beispiel des wasserführenden Systems von Zagreb identifizierte man drei hydrodynamische Hauptzonen und einige kleinere Zonen, die vor Allem ein Widerschein der lokalen Zuflussbedingungen sind. Die erste Zone befindet sich im Bereich der zukünftigen Schöpfstelle Črnkovec, die zweite in den Randgebieten des wasserführenden Systems und die dritte im engen Streifen neben dem Fluss Sava. Ein bedeutender Einfluss des Flusses auf die Füllung der wasserführenden Schichten wurde festgestellt.

Autor: Dr. sc. Zoran Nakić, dipl. ing. geol., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Pierottijeva 6, Zagreb

1 Uvod

Za potrebe inženjerskih aktivnosti na pojedinačnim lokacijama, podaci o razinama podzemnih voda rabe se za izradu nivograma koji opisuju dinamiku promjene razina podzemne vode na točno određenim, točkastim lokacijama u prostoru. Čest je slučaj, međutim, da su lokacije piezometara udaljene od mjesta izvođenja inženjerskih aktivnosti i kao takve nisu reprezentativne za utvrđivanje dinamike podzemne vode na pojedinim mikrolokacijama. Uz navedeno, utvrđivanje smjera i brzine toka podzemne vode na pojedinačnim lokacijama često se provodi iz karata hidroizohipsa, što predstavlja približno stanje iz dva glavna razloga:

1. karte hidroizohipsa su rezultat diskretnih mjerenja kontinuirane varijable razina podzemne vode te radi razmjerno malog broja lokacija na osnovi kojih su definirane ne moraju uvijek biti reprezentativne za opis dinamike podzemne vode u sustavu;
2. utvrđivanje smjera i brzine toka podzemne vode u pojedinim dijelovima vodonosnika najčešće se provodi pod pretpostavkom male zastupljenosti vertikalne komponente toka podzemne vode te prevladavajućih uvjeta horizontalnog toka podzemne vode [3].

U ovome radu koristimo se drugačijim pristupom, koji dopušta uključivanje najvećeg broja reprezentativnih mjerenja u analizu hidrodinamičkih promjena u sustavu. Prijašnji preliminarni rezultati istraživanja pokazali su da se mogu razlikovati hidrodinamičke zone na području zagrebačkoga vodonosnog sustava [5], [6] koji je odabran kao zanimljiv primjer, a u ovome radu prikazuju se zakonitosti promjene razine podzemne vode u pojedinim zonama. Primjenom multivarijatne statističke analize, faktorske analize glavnih komponenata (eng. *Principal Component Analysis*, PCA), utvrđena je podloga za razlikovanje pojedinih hidrodinamičkih zona u, ovome slučaju, zagrebačkoga vodonosnog sustava. Hidrodinamička je zona homogena zona, u okviru koje postoji jasno određena zakonitost promjene razina podzemne vode. Hidrodinamičke zone pokazuju prevladavajuće uvjete prihranjivanja vodonosnika u pojedinim dijelovima kompleksnog vodonosnog sustava, značaj geoloških i hidrogeoloških obilježja u formiranju zakonitosti promjene razina podzemne vode, a omogućuju i zaključivanje o prevladavajućim uvjetima toka podzemne vode u pojedinim dijelovima sustava. Lokacije piezometara koje su izabrane kao reprezentativne i koje su upotrijebljene u analizi, predstavljaju lokacije mjernih stanica za koje postoje dnevna motrenja razina podzemnih voda.

Na području zagrebačkoga vodonosnog sustava postoje značajna crpilišta koja su u funkciji vodoopskrbe grada Zagreba i okolne regije. Motrenje razina podzemne vode provodi tvrtka Vodoopskrba i odvodnja d.o.o neprekid-

no od 1990. godine na više od 220 piezometara, koji su locirani pretežito u blizini zagrebačkih crpilišta. Motrenje se provodi u plitkim i dubljim vodonosnim slojevima.

2 Primijenjena metoda

Primijenjena je multivarijatna statistička analiza, faktorska analiza glavnih komponenata, koja omogućava analizu postojećih motrenja razina podzemne vode u reprezentativnim piezometrima radi određivanja zona s identičnom promjenom razina podzemne vode u vremenu.

Faktorska analiza glavnih komponenata objašnjava odnose između nekoliko varijabli istodobno u smislu pronalazanja jednostavnijih odnosa koji osiguravaju uvid u prikrivenu strukturu podataka. Ovi jednostavniji odnosi izraženi su novim skupom varijabli, nazvanih glavne komponente (eng. *principal components*, PC), koje zadržavaju najveću količinu informacija i prikazuju način na koji su varijable međusobno povezane. Glavne komponente su vlastiti vektori matrice varijance-kovarijance ili korelacijske matrice [2]. Vlastiti vektori matrice predstavljaju glavne poluosi elipse ili elipsoida, određenih s redovima iz matrice varijance-kovarijance ili korelacijske matrice. U PCA analizira se cjelokupna varijanca podataka mjerenih varijabli. Glavni cilj PCA jest dobiti određeni broj glavnih komponenata koji će objasniti najveći mogući dio ukupne varijance [1].

U nastavku su objašnjeni glavni pojmovi koji se primjenjuju u PCA.

Povezanost glavnih komponenata s izvornim varijablama izražava se matricom opterećenja komponenata (eng. *component loading*) koja opisuje stupanj korelacije između glavnih komponenata i originalnih varijabli. Osim opterećenja komponenata, najznačajniji parametri dobiveni iz PCA su vlastite vrijednosti i suma objašnjene varijance (eng. *sum of explained variance*). Vlastita vrijednost je dio varijance objašnjen pojedinom glavnom komponentom, a suma varijance, izražena kao kumulativna vlastita vrijednost, predstavlja udio objašnjene varijance u ukupnoj varijanci. Osnovna značajka ove analize jest utvrđivanje glavnih vlastitih vrijednosti koji objašnjavaju najveći mogući dio ukupne varijance podataka [1].

U ovome su radu izvorne varijable lokacije piezometara, a vrijednosti varijabli su motrene razine podzemnih voda. Ovakvim pristupom koristili su se Winter i sur. 2000. godine [12], na primjeru četiriju istraživačkih lokacija u različitim hidrogeološkim jedinicama i klimatskim područjima u SAD-u, međutim sa znatno manje podataka nego u ovdje obrađenom primjeru zagrebačkoga vodonosnog sustava.

Originalna matrica podataka, NxM matrica, sadrži za svaku od M lokacija piezometara po N mjerenja razina. Na taj način formirana je matrica podataka F. Određiva-

nje zakonitosti promjene razine podzemne vode postiže se utvrđivanjem onog geometrijskog oblika, predstavljenog vektorom e , koji ima najveću sličnost s vektorima f_n promjena razine podzemne vode. Postupak se provodi najvećim uvećavanjem veličine:

$$(e^T F)^2, \text{ gdje je } e^T e = 1 \quad (1)$$

e - je M komponentni vektor koji je traženi geometrijski oblik (simbol e ovdje ne predstavlja bazu prirodnog logaritma),

T - je transponirana matrica,

što je jednako najvećem uvećavanju veličine:

$$e^T S e \quad (2)$$

S - je matrica kovarijance ili korelacijska matrica

$$S = F^T F / N \quad (3)$$

Primjenom Lagrangeova multiplikatora λ , najveće uvećavanje veličine u jednadžbi (1), odgovara bezuvjetnom najvećem uvećavanju veličine:

$$e^T S e - \lambda e^T e, \quad (4)$$

deriviranjem se dobije:

$$(S - \lambda I)e = 0 \quad (5)$$

I je jedinična matrica.

Rješenje jednadžbe (5) daje niz vlastitih vrijednosti λ_k ($k = 1, M$) koje se nalaze u dijagonalnoj matrici Λ , te odgovarajući niz vektora e_i ($i = 1, M$) koji se nalaze u stupcima matrice glavnih komponenata (E) za matricu kovarijance (S). Uređivanjem vlastite vrijednosti u padajućem nizu, odgovarajuće glavne komponente predstavljaju geometrijske oblike koji sukcesivno opisuju promjene u razinama podzemne vode na svim lokacijama piezometara, pod uvjetom da su glavne komponente međusobno nekorelirane.

Završni korak u postupku jest određivanje zakonitosti prostornih i vremenskih varijacija u izvornoj matrici razine podzemne vode.

Transformacijom korelacijske matrice i matrice varijance-kovarijance u matricu opterećenja komponenata (engl. *component loading*) i matricu vrijednosti komponenata (engl. *component score*), omogućeno je određivanje razlike u promjenama razine podzemne vode u pojedinim dijelovima sustava i određivanje reprezentativnih nivoograma koji opisuju temeljne hidrodinamičke značajke na lokacijama pojedinih skupina piezometara.

Opterećenja komponenata su mjera prostorne sličnosti između varijabli razina podzemne vode i svake glavne komponente. Ova sličnost izražena je kao:

$$l_{ik} = e_{ik} \lambda_k^{1/2} \quad (6)$$

l_{ik} - je koeficijent korelacije između k -te glavne komponente i i -te varijable razina podzemne vode.

Za cijeli niz varijabli i komponenata, jednadžba (6) postaje:

$$L = E \Lambda^{1/2} \quad (7)$$

L - je matrica opterećenja komponenata.

Vrijednosti komponenata su mjera vremenske sličnosti između promjena razina podzemne vode (za točno određeni datum) i svake glavne komponente. Vrijednosti komponenata su dobivene iz relacije:

$$c_{in} = e_i^T f_n \quad (8)$$

c_{in} je vrijednost n -te vrijednosti razine podzemne vode na i -tu glavnu komponentu.

Za sva motrenja i komponente, jednadžba (8) postaje:

$$C = E^T F \quad (9)$$

C je matrica vrijednosti komponenata. Vrijednosti za bilo koju glavnu komponentu imati će srednju vrijednost 0, standardnu devijaciju jednaku vlastitu vrijednosti glavne komponente, a neće biti korelirane s vrijednostima drugih glavnih komponenata.

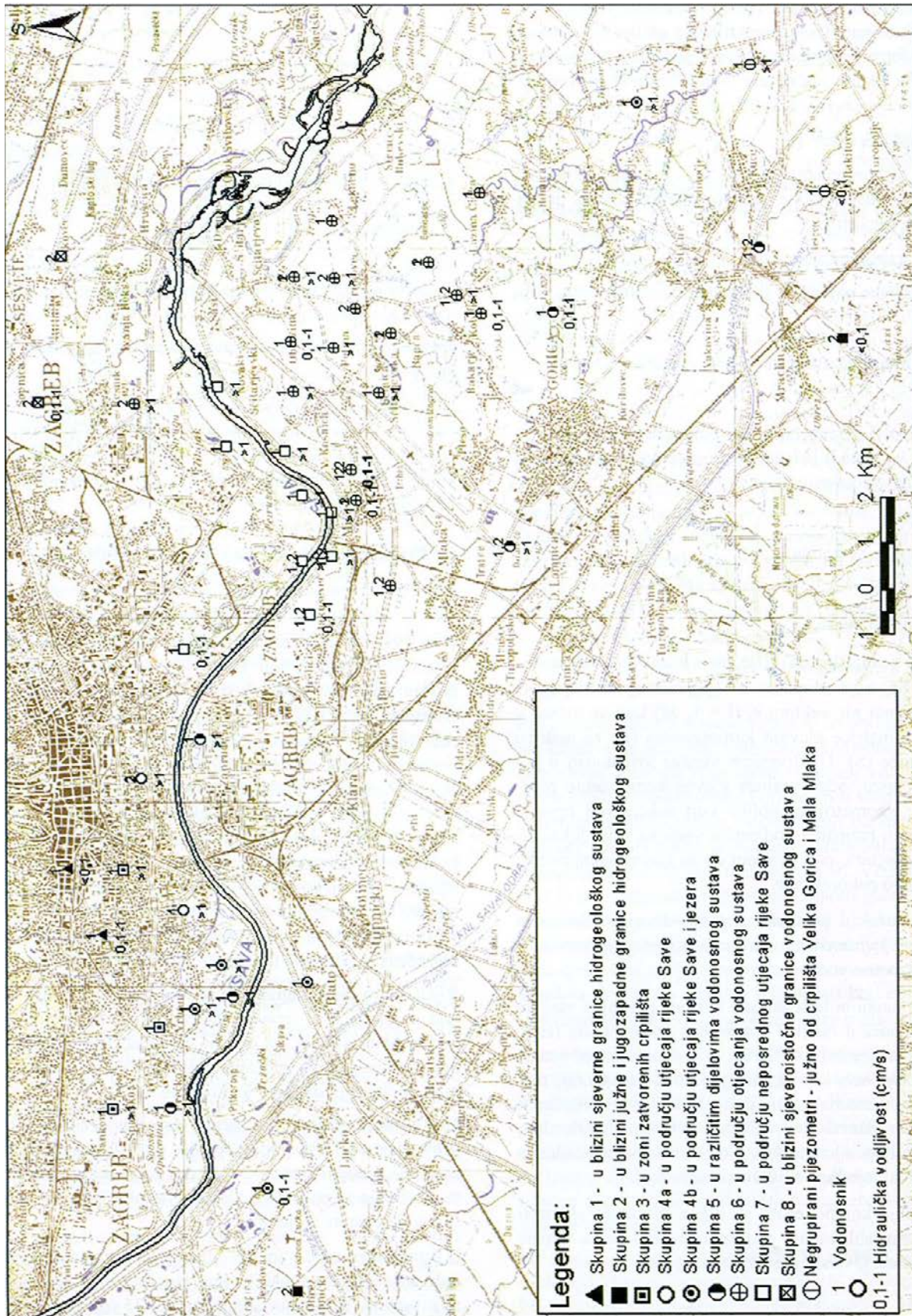
3 Primjer zagrebačkoga vodonosnog sustava

Zagrebački vodonosni sustav je kvartarne starosti, a taložen je tijekom srednjeg i gornjeg pleistocena te holocena [9]. Prema rezultatima geofizičkih istraživanja i mineraloško-petroloških ispitivanja jezgara iz dubljih bušotina na lokacijama: Resnik, Jakuševac, Petruševac i Oborovo [4], [7], [8], [10], [11], te sinteznih istraživanja radi analize vodonosnog sustava, koja su uključivala i podatke uzoraka uzetih pri bušenju zdenaca izvedenih u sklopu vodoistražnih radova, pokazalo se da je moguće razdvojiti pliči, holocenski vodonosni sloj, od dubljih, srednje-gornjopleistocenskih vodonosnih slojeva. Plitki holocenski vodonosni sloj izgrađen je od srednjozrnatih šljunaka pomiješanih s pijescima. Dublje vodonosne slojeve karakteriziraju česte lateralne i vertikalne izmjenne šljunka, pijeska i gline. Krovina vodonosnog sustava izgrađena je od praha i gline.

Rijeka Sava dijeli zagrebački vodonosni sustav u dva dijela, a nalazi se u izravnoj hidrauličkoj vezi s plitkim vodonosnim slojem. U okviru zagrebačkoga vodonosnog sustava postoje značajna crpilišta koja su u funkciji vodoopskrbe grada Zagreba i okolne regije.

Na području Zagreba, motrenje razina podzemne voda provodi se od 1990. godine na više od 220 piezometara, koji su smješteni pretežito u blizini zagrebačkih crpilišta. Motrenje se provodi u plitkom vodonosniku i u dubljim vodonosnim slojevima.

U primjeni faktorske analize glavnih komponenata u određivanju hidrodinamičkih zona zagrebačkoga vodonosnog sustava uključena su mjerenja sa 75 reprezentativ



Slika 1. Skupine niezometara na području zagrebačkoga vodonosnog sustava

nih piezometara, a obuhvaćeni su nizovi podataka od 1990. do 2000. s ukupno 1025 mjerenja po piezometru. Za odabir reprezentativnih piezometara usvojeni su sljedeći kriteriji [5]:

- odabrane lokacije obuhvaćaju cijelo razmatrano područje: od Stupničkog Obreža na zapadu do Rugvice na istoku,
- nizovi podataka su kontinuirani u vremenu praćenja,
- u analizu su uključeni piezometri s različitim dubinom ugradnje filtra,
- iz analize su isključeni piezometri koji se ponavljaju s obzirom na geografski položaj i dubinu ugradnje filtra.

Originalna matrica podataka, NxM matrica, sadrži za svaku od M piezometara (M stupaca – 75 piezometara) po N mjerenja razina (N redova – 1025 mjerenja). Podaci su standardizirani (srednja vrijednost 0, standardna devijacija 1) kako bi se vrijednostima (razinama podzemne vode) pojedinih varijabli (piezometara) dala jednaka težina.

Položaji navedenih 75 reprezentativnih piezometara čiji su podaci obrađeni prikazani su na slici 1.

4 Rezultati

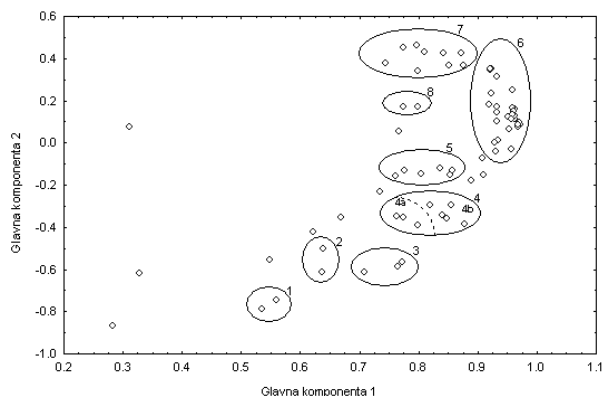
Rezultati faktorske analize glavnih komponenata pokazali su da je najveći dio varijance (88%) objašnjen s pomoću prve tri glavne komponente (tablica 1.).

Tablica Vlastite vrijednosti iz faktorske analize glavnih komponenata, postotak ukupne varijance, kumulativne vrijednosti vlastite vrijednosti i kumulativni postoci objašnjeni glavnim komponentama

Komponente	Vlastite vrijednosti	postotak ukupne varijance	Kumulativne vlastite vrijednosti	Kumulativni [%]
1	49,28	70,41	49,29	70,41
2	8,18	11,68	57,46	82,09
3	3,96	5,66	61,43	87,75

Grafički prikaz opterećenja komponenata (eng. *component loading graph*) za prvu i drugu glavnu komponentu pokazuje da je većina piezometara grupirana u osam skupina (slika 2.). Svaka skupina određena je iz grafičkog prikaza opterećenja komponenata za prvu i drugu glavnu komponentu koje objašnjavaju najveći dio ukupne varijance podataka. Osnovno obilježje u razlikovanju pojedinih skupina jest činjenica da svaka skupina piezometara ima karakterističan oblik nivograma, a pokazuje

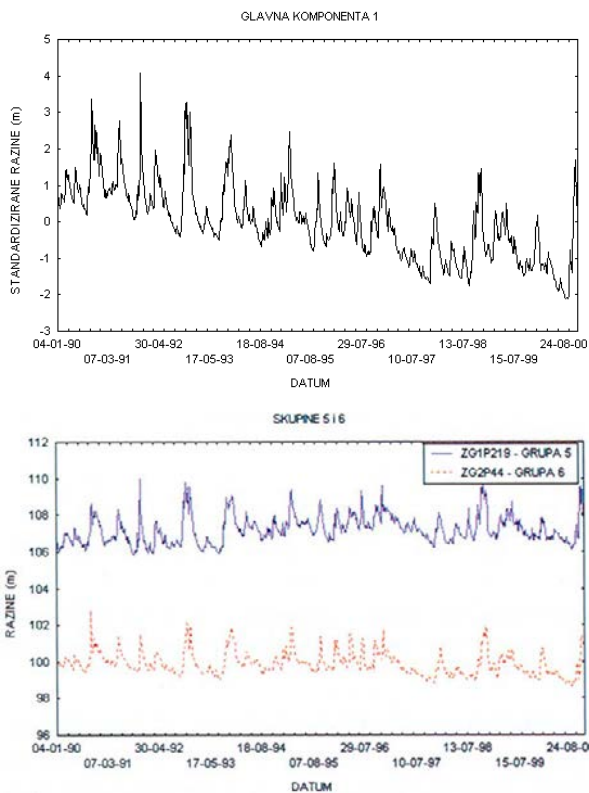
različitosti hidrodinamičkih značajki u pojedinim dijelovima vodonosnog sustava.



Slika 2 Grafički prikaz opterećenja komponenata za prvu i drugu glavnu komponentu

Uspoređivanjem karakterističnih oblika nivograma svake skupine piezometara, s dijagramima vrijednosti komponenata pojedinih glavnih komponenata, izdvojene su one skupine u kojima se oblik nivograma može opisati s reprezentativnim dijagramom vrijednosti komponenata.

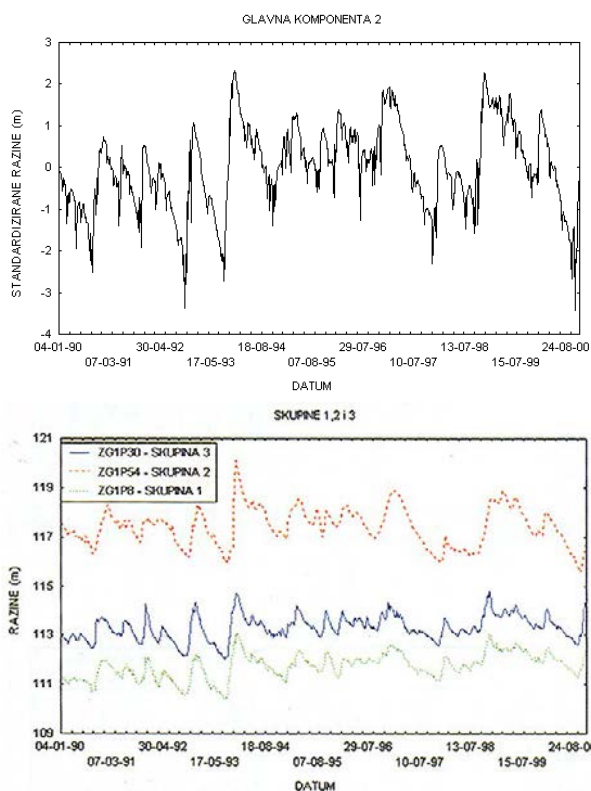
Nivogrami piezometara iz skupina 5 i 6 slični su dijagramu vrijednosti komponenata prve glavne komponente (slika 3.). Ovi piezometri nalaze se u području otjecanja



Slika 3. Nivogrami skupina piezometara 5 i 6 korelirani s dijagramom vrijednosti komponenata za prvu glavnu komponentu

vodonosnog sustava (slika 1.). Oblik nivograma je isti i u plitkom i u dubljim slojevima, a odražava utjecaje: regionalnog toka podzemne vode od zapada prema istoku, jačanja utjecaja vertikalne komponente toka podzemne vode u ovom dijelu sustava i utjecaj rijeke Save.

Nivogrami piezometara iz skupina 1,2 i 3 slični su dijagramu vrijednosti komponenata druge glavne komponente (slika 4.). Skupina 1 piezometara nalazi se na lijevoj obali rijeke Save, na granici isklinjavanja prvoga vodonosnoga sloja; skupina 2 piezometara nalazi se na desnoj obali rijeke Save, u blizini južne granice vodonosnog sustava; skupina 3 nalazi se na lijevoj obali rijeke Save, u priljevnom području bivših gradskih crpilišta koja su izvan eksploatacije već dulji niz godina. Ovi se piezometri nalaze u rubnim dijelovima vodonosnog sustava (slika 1.), gdje se osjeća oslabljeni utjecaj rijeke Save ili je prisutno znatno vremensko zaostajanje širenja vodnog vala, a osim toga utjecaj crpenja s postojećih zagrebačkih crpilišta je neznatan ili ga uopće nema.

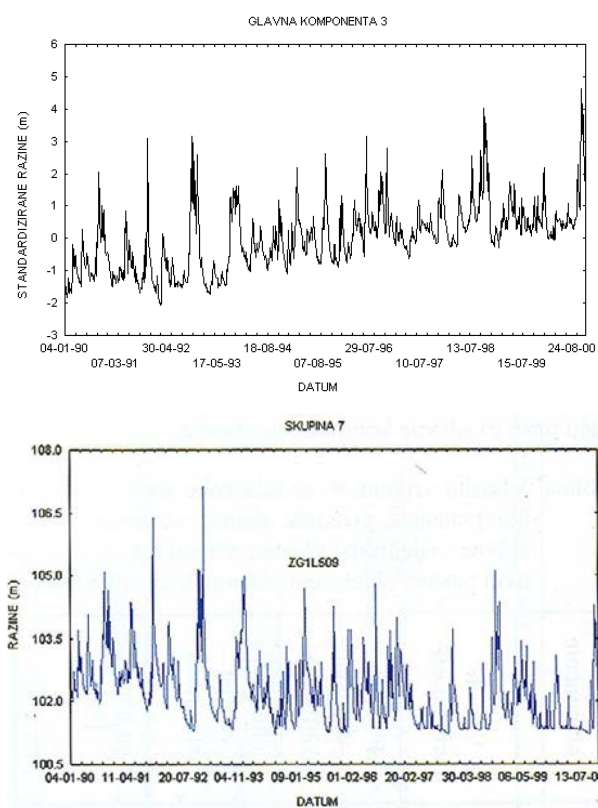


Slika 4. Nivogrami skupina piezometara 1, 2 i 3 korelirani s dijagramom vrijednosti komponenata za drugu glavnu komponentu

Za razliku od piezometara iz skupina 1 i 3, koji se nalaze na lijevoj obali rijeke Save i gdje postoje lokalni uvjeti prihranjivanja koji utječu na promjenu razina podzemne vode u plićem sloju, piezometri iz skupine 2 nalaze se na desnoj obali rijeke i ukazuju na dugotrajnije, sezonske uvjete prihranjivanja dubljih vodonosnih slo-

jeva. Također, postojeće razlike između navedenih skupina posljedica su i različitih propusnosti vodonosnih slojeva (slika 1). Međutim veoma je značajna činjenica da prostorno izdvojene skupine piezometara, skupina 2 u odnosu na skupine 1 i 3, imaju sličan oblik nivograma. To upozorava na povećani dotok s bočnih rubova u vodonosni sustav te značajnu infiltraciju oborina s površine terena.

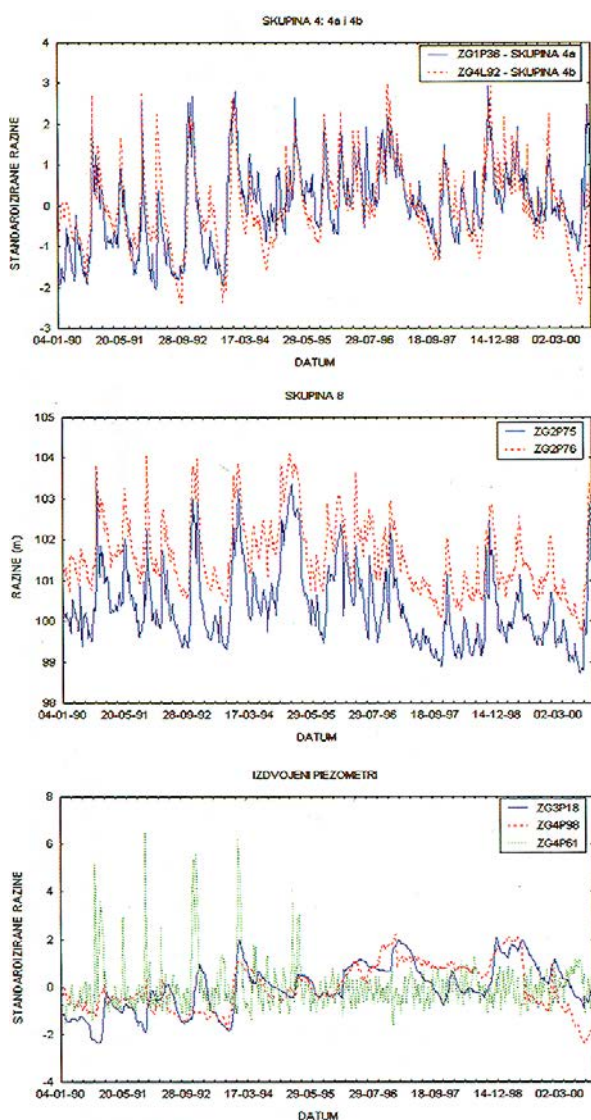
Nivogrami piezometara iz skupine 7 slični su dijagramu vrijednosti komponenata treće glavne komponente (slika 5.). Ovi piezometri locirani su neposredno uz rijeku Savu (slika 1.), a vrlo velika kolebanja razine podzemne vode su odraz brzih i jakih utjecaja promjene vodostaja u rijeci na promjene razina podzemne vode u pojasu uz rijeku.



Slika 5. Nivogrami skupine piezometara 7 korelirani s dijagramom vrijednosti komponenata za treću glavnu komponentu

Nivogrami piezometara iz skupina 4 i 8 razlikuju se od dijagrama vrijednosti komponenata za tri najznačajnije glavne komponente. Skupina 4 podijeljena je na dvije podskupine, s obzirom na lokalne utjecaje i prostorni smještaj piezometara. Iz standardiziranih se nivograma vidi je da su oblici nivograma dviju podskupina piezometara vrlo slični, iako se zapažaju veće vrijednosti ekstrema kod piezometara iz podskupine 4b (slika 6.). Podskupina 4a povezuje piezometre koji se nalaze na loka-

cijama gdje su značajni utjecaji rijeke Save i u plitkom i u dubljem sloju, s razmjerno visokim vrijednostima koeficijenta hidrauličke vodljivosti (slika 1.). Podskupini 4b pripadaju piezometri koji se nalaze na lokacijama gdje su, osim utjecaja rijeke Save, izraženi utjecaji i drugih površinskih voda (jezera, potoka) u plitkom vodonosnom sloju, također s visokom vrijednosti koeficijenta hidrauličke vodljivosti (slika 1.).



Slika 6. Nivogrami grupa piezometara za koje ne postoji značajna korelacija između nivograma i dijagrama vrijednosti komponenata najznačajnijih glavnih komponenata

Piezometri iz skupine 8 nalaze se na lijevoj obali rijeke Save, u blizini sjeveroistočne granice vodonosnog sustava, na lokacijama gdje dolazi do isklinjavanja plitkog vodonosnog sloja (slika 1.). Razmjerno nagle promjene razina podzemne vode u vremenu na lokacijama ovih

piezometara posljedica su značajne propusnosti krovinskih naslaga vodonosnog sloja, kopnenih i akvatičnih prapornih naslaga. U vrijeme intenzivnih oborina, na ovim lokacijama postoji vrlo brzo procjeđivanje vode kroz krovinske naslage prema vodonosnom sloju. Oblik nivograma piezometara, koji se nalaze uz rub vodonosnog sustava, ovisi ponajprije o litološkim značajkama naslaga u kojima su izvedeni piezometri.

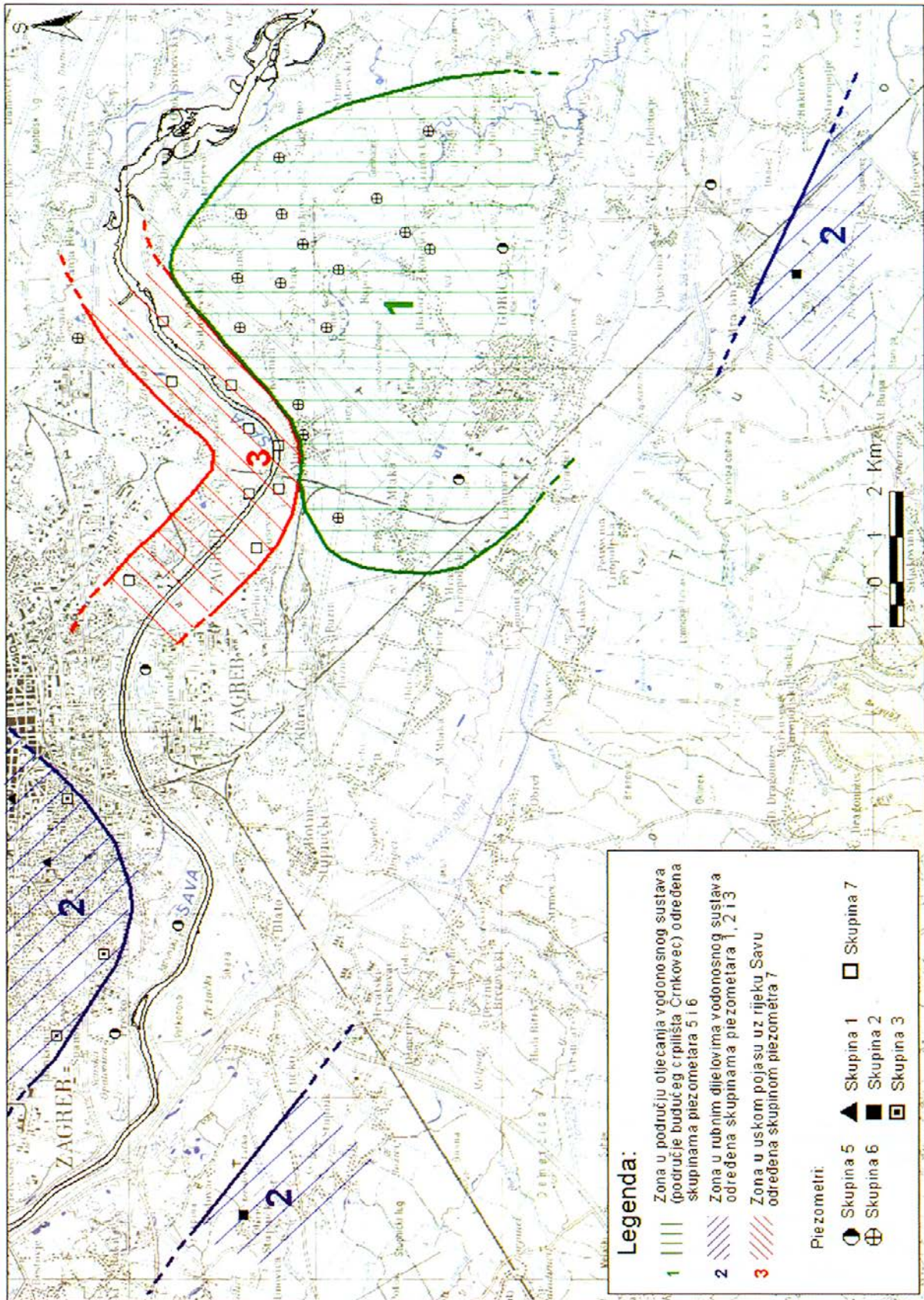
Izdvojeni piezometri, koji ne pripadaju niti jednoj skupini piezometara, locirani su na desnoj obali rijeke Save, južno od crpilišta Velika Gorica i Mala Mlaka (slika 1.). Oblik nivograma ovih piezometara značajno se razlikuje, s obzirom na lokalne uvjete prihranjivanja plitkog vodonosnog sloja (slika 6.). Njihovo zajedničko obilježje jest značajna varijacija razina podzemne vode, s jakim maksimumima za kišnih razdoblja, sve do 1995. godine. Od tada su promjene manje, bez većih odstupanja od prosječnih vrijednosti. Ove su pojave posljedica sniženja razina podzemne vode u ovom dijelu vodonosnog sustava, prvenstveno zbog sniženja korita rijeke Save u posljednjih dvadeset godina, kao posljedica erozivnih procesa, te intenzivnog crpenja podzemne vode na crpilištima Mala Mlaka i Velika Gorica. Kao rezultat, produkuje se vrijeme procjeđivanja oborinskih voda do vodnog lica, a oblici nivograma piezometara pokazuju dugotrajnije, sezonske uvjete prihranjivanja vodonosnih slojeva.

Na slici 7. prikazane su tri glavne hidrodinamičke zone. Ove zone ograničavaju područja zagrebačkoga vodonosnog sustava u kojima se oblik nivograma skupina piezometara može opisati s reprezentativnim dijagramom vrijednosti komponenata za prve tri glavne komponente. Određivanje hidrodinamičkih zona u preostalom dijelu vodonosnog sustava bit će moguće tek nakon uspostave stalnog motrenje u područjima u kojima nedostaju dovoljno kvalitetni podaci za točnije određivanje zakonitosti promjena razina podzemne vode.

5 Zaključak

U radu je opisana analiza hidrodinamičkih promjena u kompleksnom vodonosnom sustavu, primjenom faktorske analize glavnih komponenata. Uključivanjem izmjenjenih razina podzemne vode u reprezentativnim piezometrima, utvrđene su hidrodinamičke homogene zone na primjeru zagrebačkoga vodonosnog sustava u kojima je utvrđena zakonitost promjene razina podzemne vode.

Hidrodinamička zona 1 određena je u području otjecanja vodonosnog sustava, u zoni budućeg crpilišta Črnkovec. Ova zona zauzima široki pojas od: Mičevca na zapadu, Velike Kosnice na sjeveru, naselja Lekneno na istoku do Kobilića i Lazin Čička na jugu. Oblik nivograma piezometara je isti i u plitkom i u dubljim slojevima, a odražava utjecaje: regionalnog toka podzemne vode od



Slika 7. Glavne hidrodinamičke zone na području zagrebačkoga vodonosnog sustava

zapada prema istoku, jačanja utjecaja vertikalne komponente toka podzemne vode u ovom dijelu sustava, kao i utjecaj rijeke Save.

Hidrodinamička zona 2 utvrđena je u rubnim dijelovima vodonosnog sustava, gdje se očituje oslabljeni utjecaj rijeke Save ili je prisutno znatno vremensko zaostajanje širenja vodnog vala, a osim toga utjecaj crpljenja s postojećih zagrebačkih crpilišta je neznatan ili ga uopće nema. Sličan oblik nivograma prostorno izdvojenih skupina piezometara, pokazuju da je dinamika promjene razine podzemne vode uvjetovana utjecajem dotoka s bočnih rubova u vodonosni sustav te infiltracijom oborina s površine terena.

U uskoj zoni uz rijeku Savu formirana je hidrodinamička zona 3 u kojoj su prisutna vrlo velika kolebanja razina podzemne vode. Oblik nivograma piezometara uz rijeku Savu odraz je brzih i jakih utjecaja promjene vodostaja u rijeci na promjene razina podzemne vode u pojasu uz rijeku.

Faktorskom analizom glavnih komponenata izdvojena su prostorno ograničena područja, u kojima je oblik nivograma piezometara odraz lokalnih uvjeta prihranjivanja vodonosnog sustava i hidrauličkih značajki vodonosnog horizonta. Jedna takva skupina piezometara nalazi se na lijevoj obali rijeke Save, u blizini neaktivnih gradskih crpilišta. Ovdje dominantni utjecaj na prihranjivanje vodonosnog horizonta ima rijeka Sava, a utvrđene su visoke vrijednosti koeficijenta hidrauličke vodljivosti u prvom i drugom vodonosnom sloju. Druga skupina piezometara nalazi se na lijevoj i desnoj obali rijeke Sa-

ve, u blizini jezera Jarun i Ježdovec. Visoke vrijednosti koeficijenta hidrauličke vodljivosti prvog vodonosnog horizonta i sličan oblik nivograma piezometara koji se nalaze neposredno uz jezera, ukazuju na mogućnost da je zakonitost promjene razina podzemne vode na ovim lokacijama vezana za promjene vodostaja u jezerima.

Karakterističan oblik nivograma utvrđen je za piezometre koji se nalaze u blizini sjeveroistočne granice vodonosnog sustava. Razmjerno nagle promjene razina podzemne vode u vremenu na lokacijama ovih piezometara posljedica su značajne propusnosti krovinskih naslaga vodonosnog sloja, kopnenih i akvatičnih prapornih naslaga. U vrijeme intenzivnih oborina, na ovim lokacijama postoji vrlo brzo procjeđivanje vode kroz krovinske naslage prema vodonosnom sloju.

Za izdvojene piezometre, koji se nalaze južno od crpilišta Mala Mlaka i Velika Gorica, oblici nivograma pokazuju da se od 1995. godine značajno mijenja zakonitost promjene razina podzemne vode. Do tada su obilježje nivograma značajne varijacije razina podzemne vode, s jako izraženim maksimumima za kišnih razdoblja. Od 1995. ove su varijacije mnogo manje, a zabilježena su i značajna sniženja razina podzemne vode. Uzroci sniženja razina podzemne vode su sniženje korita rijeke Save u posljednjih dvadeset godina, kao posljedice erozivnih procesa, te intenzivno crpenje podzemne vode na crpilištima Mala Mlaka i Velika Gorica. Kao rezultat, produkuje se vrijeme procjeđivanja oborinskih voda do vodnog lica, a oblici nivograma piezometara pokazuju dugotrajnije, sezonske uvjete prihranjivanja vodonosnih slojeva.

LITERATURA

- [1] Brown, C. E.: *Applied Multivariate statistics in geohydrology and related sciences*, Springer-Verlag, Berlin, 1998.
- [2] Davis, J. C.: *Statistics and data analysis in geology*, John Wiley & Sons, New York-Chichester-Brisbane-Toronto-Singapore, 2002.
- [3] Domenico, A.P. & Schwartz, F.W.: *Physical and Chemical Hydrogeology*, John Wiley & Sons, New York-Chichester-Brisbane-Toronto-Singapore, 1990.
- [4] Hernitz, Z.; Kovačević, S.; Velić, J.; Željko, U. & Urli, M.: *Primjer kompleksnih geološko-geofizičkih istraživanja kvartarnih naslaga u okolici Prevlake*. Geol. vjesnik 33 (1981), 11-34.
- [5] Nakić, Z.: *Uzroci i posljedice promjene kakvoće podzemne vode na zagrebačkom području*, Doktorska disertacija, RGN fakultet, Zagreb, 2003.
- [6] Nakić, Z.; Bačani, A. & Perković, D.: *Hydrodynamic zoning of complex aquifer systems: the Zagreb aquifer (Croatia)*. 1st International Conference on Groundwater in Geological Engineering, 22-26.09.2003. Bled, Slovenija. Proceedings in: RMZ-MATERIALS AND GEOENVIRONMENT/ Pezdić, J. (ur.), Ljubljana, Vol 50, No.1, 257-260.
- [7] Šimunić, A.; Basch, O.: *Stratigrafija kvartarnih sedimenata Zagrebačkog Posavlja*. Geol. vjesnik 28 (1975), 153-164.
- [8] Šimunić, A.; Novosel-Škorić, S.; Piljurović, L.J.: *Litološka korelacija i kronostratigrafsko razgraničavanje kvartarnih naslaga na lokalitetu Prevlaka jugoistočno od Zagreba*. Geol. vjesnik 41 (1988), 167-179.
- [9] Velić, J.; Durn, G.: *Alternating Lacustrine-Marsh Sedimentation and Subaerial Exposure Phases During Quaternary*: Prečko, Zagreb, Croatia. Geol. Croat., 46/1 (1993), 71-91.
- [10] Velić, J.; Saftić, B.: *Dubinskogeološki odnosi područja smetlišta "Jakuševac" - čimbenik sanacije*. IV. Međunarodni simpozij (Gospodarenje otpadom-Zagreb '96), Zbornik radova, Zagreb (1996), 197-205.
- [11] Velić, J.; Saftić, B.; Malvić, B.: *Lithologic Composition and Stratigraphy of Quaternary Sediments in the Area of the "Jakuševac" Waste Depository (Zagreb, Northern Croatia)*, Geol. Croat., 52/2 (1999), 119-130.
- [12] Winter, T.C.; Mallory, S.E.; Allen, T.R.; Resenberry, D.O.: *The use of Principal component analysis for interpreting ground water hydrographs*. Ground Water, Vol.38 (2000) No.2, 234-246.