

## Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“



---

**qWells, ver: 0.\***

---

## **PROGRAM ZA PRORAČUN STRUJANJA PODZEMNIH VODA PREMA USAMLJENOM, ILI GRUPI BUNARA**

Milan Dotlić, Boris Pokorni, Milenko Pušić, Goran Jevtić, Milan Dimkić

Beograd, 2016.

## PREDGOVOR

Obrada podataka probnog crpenja, testiranja bunara, nesumnjivo predstavlja nezaobilazni postupak u okviru izrade novog bunara, kao i prilikom periodične provere kvaliteta njegovog rada. Takođe, ona se sprovodi i u okviru drugih istraživanja od značaja za hidrogeologiju. Uobičajene metode koje se u praksi sprovode su grafoanalitičke metode, koje su i najjednostavnije i najbrže za realizaciju. Ove metode imaju svoja ograničenja, koja u praksi često nije lako prevazići. Odstupanja prirodnih uslova od teorijskih postavki korišćenih jednačina traže dodatna objašnjenja, koja se najčešće mogu samo kvalitativno iskazati. Njihovo pravilno tumačenje često traži zavidnu stručnost i iskustvo obradivača.

Odavno postoji potreba za naprednjim korišćenjem sve moćnijih računara, dakle metodom, postupkom, softverom, ili programom, koji omogućava sveobuhvatniju analizu registrovanih podataka praćenja testiranja bunara. Pod ovim se podrazumeva primena već poznate teorijske osnove strujanja prema bunaru, ali u uslovima korišćenja svih registrovanih podataka, što kod klasičnih grafoanalitičkih metoda nije slučaj. Takođe, cilj je da se značajno olakša posao i mogućnost obrade podataka i u relativno složenim uslovima: rad više bunara, sa promenljivim proticajima. Program qWells sve to sadrži. Značajno je i to da nema ograničenja u pogledu broja bunara i pijezometara, kao i promena proticaja, osim memorije računara.

Program qWells je nastao iz odavno korišćenog programa MVAS17SD, razvijenog u Institutu za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, davnih 70.-tih godina XX veka. Autori programa su bili prof. Dr Milan Vuković i inženjer Andelko Soro, koji su tada, na platformi DOS operativnog sistema, napravili ovaj veoma koristan program. Od tada je program MVAS17SD doživeo više izdanja i adaptacija, da bi, pojavom nove verzije operativnog sistema Windows, prestala mogućnost njegovog korišćenja u izvornom obliku. Program je nastao tokom 2016. godine, na zahtev inženjera koji već decenijama koriste izvorni kod, u Windows okruženju. Ovo je sad savremeni softver, koji omogućava obradu podataka na savremen, komforan i brz način.

Autorski tim želi da korišćenjem QWells-a, olakša rad i podigne na viši nivo praksu analize radijalnog strujanja, kroz analizu i prognozu efekata rada jednog ili grupe bunara, bez, ili sa pristustom više pijezometara. Nije bezznačajna mogućnost obrade svih podataka praćenja testiranja bunara. Ovakav pristup omogućava i viši nivo saznavanja hidrogeoloških osobina analizirane izdani, kao i karakteristika bunara.

Korišćenje softvera je moguće na licenciranoj verziji, pri čemu se licenca dokazuje ugovorom između Instituta i Korisnika.

Autorski tim čine kolege matematičari, programeri dr Milan Dotlić i dr Boris Pokorni, zatim incijator cele ideje inženjer hidrogeologije Goran Jevtić, koordinator prof. dr Milenko Pušić i prof. dr Milan Dimkić u ulozi savetnika.

Ovom prilikom se autori zahvaljuju kolegama inženjerima Institutima, koji su testirali softver tokom njegovog razvoja, ukazivali na uočene nedostatke i greške i nestrpljivo očekivali njegovu prvu zaokruženu verziju.

Beograd, avgust 2016.

AUTORI

## **UVOD**

qWells je softver dvojne namene: prvenstveno je namenjen obradi probnog (opitnog) crpenja bunara (u opštem slučaju nazivamo ga testiranje bunara), a u drugom, pod određenim uslovima može da se koristi za dugoročnu prognozu efekata rada bunara.

Softver je zasnovan na jednačini strujanja prema usamljenom bunaru, ali se može koristiti i u slučaju rada više bunara, sa međusobnim uticajima. Ova osobina mu daje prednost u odnosu na jednostavnije, prvenstveno grafoanalitičke metode obrade podataka crpenja bunara. Druga prednost je u tome, što omogućava primenu i u brojnim slučajevim ograničenja prostiranja izdani, koja se mogu predstaviti analitičkim izrazima.

qWells omogućava dobijanje reprezentativnih veličina koeficijenta vodopravodnosti i specifične izdašnosti izdani, granica (tip i udaljenje) prostiranja akvifera, kao i koeficijenata parazitskih, odnosno lokalnih hidrauličkih otpora u bunaru i prifiltarskoj zoni.

Program nema ograničenja u pogledu broja bunara i pijezometara, tako da je moguće sprovoditi prognoze i u uslovima složenog rada izvorišta.

Ovo uputstvo se sastoji iz dva dela: praktičnog, ustvari uputstva za korišćenje programa i teorijskog, gde se daje teorijska osnova jednačine strujanja prema bunaru, sabiranje (superpozicija) elementarnih strujanja, prikaz i tumačenje parazitskih (lokalnih) hidrauličkih otpora u bunaru i prifiltarskoj zoni.

## PROGRAM QWELLS

---

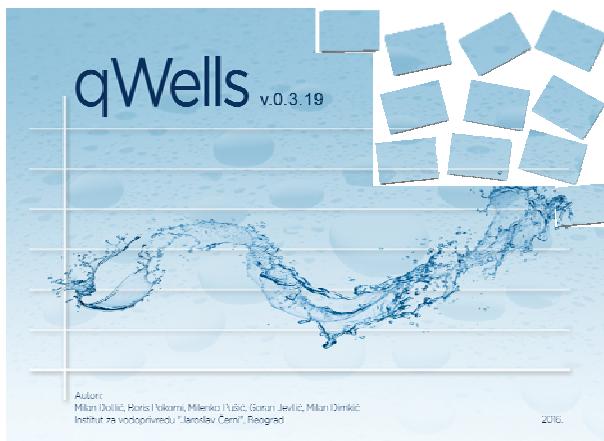
### UVODNE NAPOMENE

Pre početka korišćenja programa qWells neophodno je pripremiti ulazne podatke na odgovarajući način. Postoje dva osnovna zahteva:

- prvo, postoji jedinstvena vremenska osa, za sve analizirane objekte i podatke,
- drugo, sve depresije, u svim objektima, treba da budu računate od jedinstvenog statičkog nivoa.

Program qWells instalira na računar ovlašćeno lice Instituta uz pomoć šifre.

Program qWells se pokreće klikom na fajl programa sa ekstenzijom .exe. Na ovaj način aktivira se osnovni prozor programa, sa pozdravnom **slikom 1**, koja nestaje posle oko 2 sekunde.

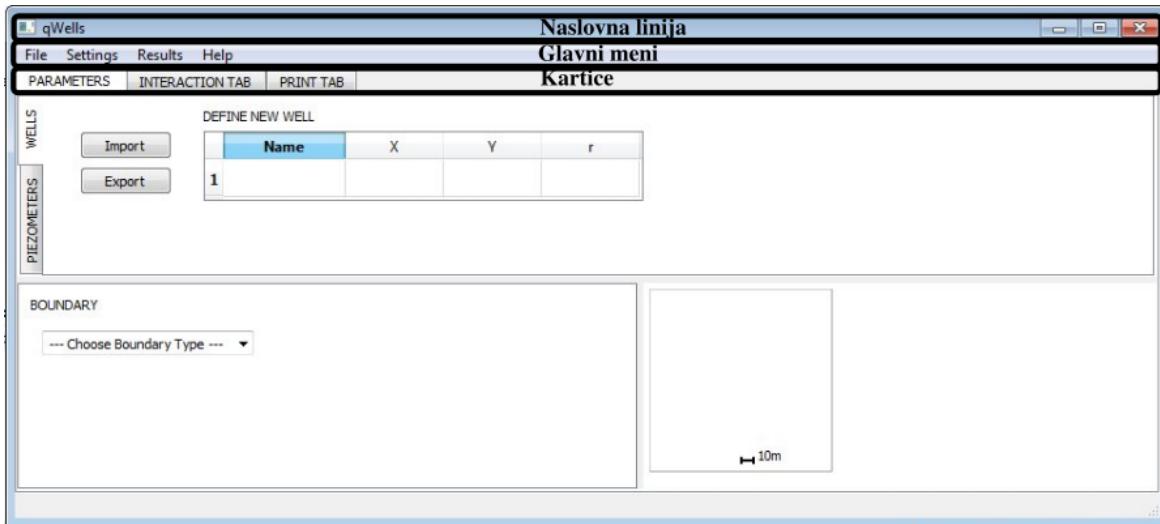


Slika 1. Uvodna slika programa qWells

### STRUKTURA SOFTVERA

Program qWells je koncipiran po ugledu na standardne Windows aplikacije. Osnovni prozor, **slika 2**, sastoji se od: naslovne linije, glavnog menija i menija sa karticama.

Naslovna linija sadrži naslov trenutno otvorenog dokumenta i opcije za minimizovanje, maksimizovanje i zatvaranje prozora aplikacije.



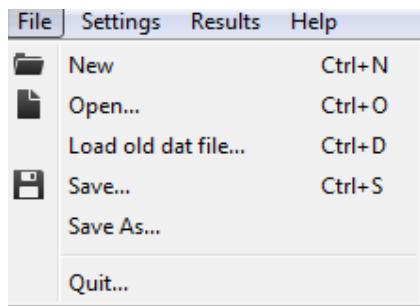
Slika 2. Osnovni prozor programa qWells

Glavni meni sastoji se od sledećih podmenija: File, Settings, Results, Help. Svaki od ovih podmenija biće detaljno predstavljen u nastavku teksta.

Meni sa karticama sastoji se od kartica: PARAMETERS, INTERACTION TAB, PRINT TAB i VISUALIZATION. Svaka od kartica biće detaljno objašnjena u nastavku teksta.

## MENI FILE

Meni *File*, slika 3, sadrži standardne Windows funkcije: kreiranje novog modela (New), učitavanje ranije snimljenog modela (Open), učitavanje fajla pripremljenog za program BOSKO17 (Load old dat file), snimanje trenutnog modela (Save), snimanje trenutnog modela pod drugačijim imenom (Save As) i naredbu za izlaz iz programa (*Quit*).

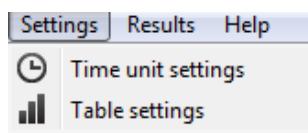


Slika 3. File meni

Program qWells model može učitati (ili snimiti) samo iz fajlova (datoteka) sa ekstenzijom *.wjci*. Napomena: program qWells je moguće pokrenuti duplim klikom na fajl sa ekstenzijom *.wjci* ukoliko je to podešeno u operativnom sistemu (Windows).

## MENI SETTINGS

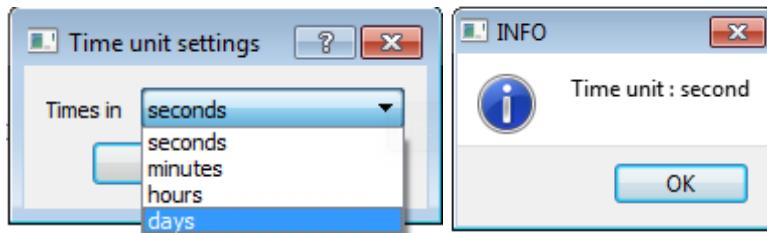
Meni Settings, slika 4, sadrži opcije *Time unit settings* i *Table settings*.



Slika 4. Settings meni

Klikom na opciju *Time unit settings* otvara se prozor, slika 5 levo, u kome se podešavaju vremenske jedinice u kojima se unose podaci. Obratiti pažnju da je vremenske jedinice moguće postaviti jedino

**PRE** nego što se unese prvi podatak. Kada je unet bilo koji podatak vremenske jedinice više nije moguće menjati, [slika 5 desno](#).



Slika 5. Prozor Time unit settings

Klikom na opciju *Table settings* aktivira se prozor u kome se podešava maksimalni broj vidljivih redova u tabelama gde se zadaju podaci.

Napomena: Maksimalni broj vidljivih redova zavisi i od veličine ekrana, tako da može da bude u intervalu od, na primer 3, pa do 13, a više.

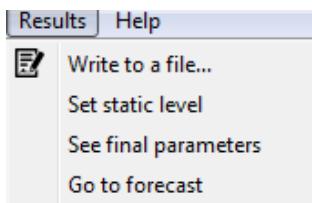
## MENI RESULTS

Meni Results, [slika 6](#), sadrži opcije za ispis rezultata u fajl (*Write to a file*), za postavljanje statičkog nivoa (*Set static level*), za pregledanje dobijenih parametara (*See final parameters*) i za prelazak na prognozne proračune (*Go to forecast*).

Fajl sa rezultatima ima ekstenziju *.rez* i u njemu su dati rezultati proračuna depresija u bunarima i pijezometrima, registrovani podaci i međusobne razlike. Za bunare su još iskazani ukupni lokalni hidraulički otpori i depresije sa i bez otpora.

Klikom na *Set static level* otvara se dijalog gde se setuje da li će se u prikazu koristiti statički nivo i ako hoće, njegova vrednost.

Klikom na prognozu (*Go to forecast*) brišu se mereni podaci u bunarima i pijezometrima, kao i proticaji za bunare.



Slika 6. Results meni

Zatim se otvara novi fajl u koji treba upisati podatke za prognozni račun.

## MENI HELP

Meni Help, [slika 7](#), sadrži uputstvo za korišćenje (*qWells help*) i opšte informacije o softveru qWells (*About*).

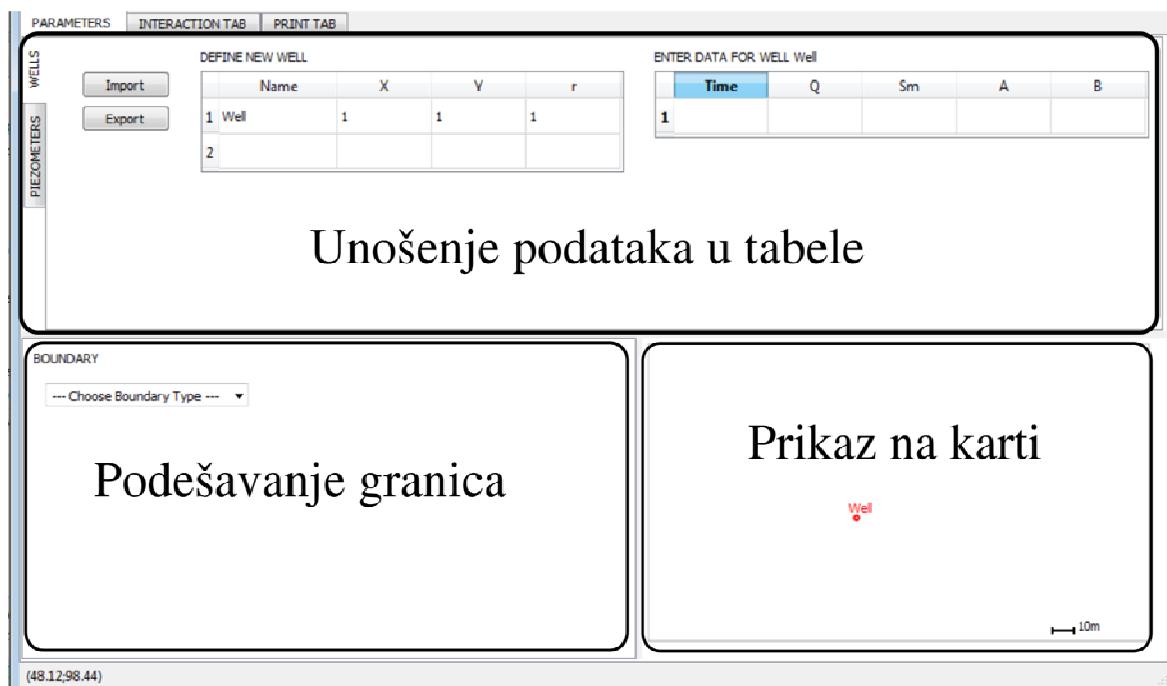


Slika 7. Help meni

## Kartica PARAMETERS

Kartica PARAMETERS služi za unošenje podataka i podešavanje granica. Njen izgled je podeljen na tri dela, [slika 8](#):

- tabele za unošenje podataka sa terena u tabele,
- podešavanje granica,
- grafički prikaz karte terena.



Slika 8. Kartica PARAMETERS

### UNOŠENJE PODATAKA U TABELE

Ima dve vertikalne kartice: **Wells** i **Piezometers**, [slika 8](#). Na kartici **Wells** nalazi se tabela *Define new well* u kojoj se za svaki bunar definiše: naziv, X koordinata, Y koordinata i poluprečnik bunara. Svaki red ove tabele predstavlja po jedan bunar. U tabeli uvek postoji jedan red bez podataka (poslednji red).

Unošenje podataka u tabelu je UVEK potrebno potvrditi sa *Enter*. Podatak koji nije potvrđen, prikazan je u crvenoj boji, pritiskom na *Enter* boja se menja u crnu. Ukoliko želimo da izbrišemo neki bunar u tabeli *Define new well* potrebno je kliknuti na taj dvaput na taj red (na broj reda skroz levo) i potom pritisnuti *Delete* na tastaturi.

Upisivanje koordinata može da bude zamorno, tako da se može kopirati, na primer iz Excel-a, sa desnim klikom i klikom na *Paste*. *Ctrl+V* ovde ne radi da bi se razlikovalo od unošenja podataka u desnu tabelu („*Enter data for ...*“).

Svaki bunar (svaki red u tabeli *Define new well*) ima tabelu *Enter data for well*, [slika 9](#). Ovoj tabeli pristupamo klikom na red (ili na podatak u redu) koja se odnosi na željeni bunar u tabeli *Define new well*.

U ovoj tabeli se definiše vreme (*Time*) merenja (vremenska jedinica je prethodno definisana u *Settings > Time unit settings*), proticaj (*Q*) izražen u litrima po sekundi, izmerena depresija (*Sm*) izražena u metrima, koeficijent linearog lokalnog hidrauličkog otpora bunara, *A* [ $\text{sm}^{-2}$ ]) i koeficijent kvadratnog lokalnog hidrauličkog otpora bunara, *B* [ $\text{s}^2\text{m}^{-5}$ ]. Isto kao i u tabeli *Define*

*new well* svaki unos je potrebno potvrditi sa (*Enter*). Za razliku od tabele *Define new well* gde je potrebno definisati svaki podatak u redu, u tabeli *Enter data for well* nije potrebno definisati svaki podatak u redu, ali je potrebno da za svaki podatak u kolonama *Q*, *Sm*, *A*, *B* postoji unet odgovarajući vremenski trenutak, [slika 9](#). Takođe, za svaki vremenski trenutak potrebno je uneti barem po jedan podatak *Q*, *Sm*, *A* i *B*.

ENTER DATA FOR WELL Well

	Time	Q	Sm	A	B
1	100	10		1	
2	200		3.75		0.3
3	400	5			

**Slika 9.** Pravilno uneti podaci u tabelu *Enter data for well*

Brisanje reda u tabeli se obavlja na isti način kao u tabeli *Define new well* dvostrukim klikom na neki red red (na broj reda skroz levo) i pritiskom na taster *Delete* na tastaturi. U tabelu nije moguće upisati dva ista vremenska trenutka. Ukoliko se to pokuša dobija se upozorenje kao na [slici 10](#).

	Time	Q	Sm	A	B
1	0	5	0	1	10
2	100		0.1		
3	250		0.2		
4	250				

WARNING : Time already exists!

**Slika 10.** Pokušaj unošenja istog vremenskog trenutka

Ukoliko se pokuša unošenje vremenskog intervala koji je manji od prethodnog javlja se upozorenje kao na [slici 11](#). Ukoliko se nastavi sa unošenjem ovaj red tabele se pomera tako da tabela bude rastuće sortirana po vremenu.

ENTER DATA FOR WELL b

	Time	Q	Sm	A	B
2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3
4	5	5	5	5	5
5	4				

WARNING : Time not in ascending order, row will be moved.

**Slika 11.** Pokušaj unošenja manjeg vremenskog trenutka

Podatke svakog pojedinačnog bunara je moguće snimiti klikom na dugme *Export*, odnosno učitati klikom na dugme *Import*. Ekstenzija snimljenog fajla je *.well*. Zapis ovog fajla je identičan fajlovima sa ekstenzijom *.csv* (comma separated values) i moguće ga je napraviti i menjati u Excel-u. Više o ovoj vrsti fajlova biće reči u Dodatku. Takođe, moguće je prekopirati desnu tabelu (*Enter data for well*) iz Excel-a i to tako što se obeleži deo iz Excel-a, klikne *copy* (ctrl+C) i potom u qWells-u klikne ctrl+V na neko polje tabeli. Na ovaj način se prethodna tabela zamenjuje novom. Dakle nije moguće sa ctrl+V dodavati, ili ubacivati redove u postojeću tabelu. Obeleženi deo iz Excel-a mora imati pet kolona.

Slično kao na kartici **Wells**, i na kartici **Piezometers**, [slika 12](#), postoji tabela *Define new Piezometers* u koju se unosi naziv pijezometra, X koordinata i Y koordinata. Za razliku od bunara, kod pijezometara nemamo poluprečnik. Takođe i tabela *Enter data for piezometer* je drugačija jer ima samo vreme (*Time*) i izmerenu depresiju (*Sm*).

Name	X	Y
1 p	12	12
2		

Time	Sm
1 100	3.13
2 200	3.25
3	

**Slika 12.** Kartica Piezometers za unošenje podataka

Takođe i podatke svakog pojedinačnog pijezometra je moguće snimiti klikom na dugme *Export*, odnosno učitati klikom na dugme *Import*. Ekstenzija snimljenog fajla je \*.piez. Više o ovoj vrsti fajlova biće reči u Dodatku.

### Prognostni proračuni - unošenje podataka

Kod prognostnih proračuna se često zadaje veći broj bunara i pijezometara, već prema konkretnim zahtevima. U odnosu na opitno crpenja, sigurno je potreban manji broj vremenskih trenutaka za proračun. Vremena se zadaju prema potrebi, na jednom bunaru, a može i na nekoliko njih, zavisno od vremena njihovog uključenja i željenog oblika izračunatog nivograma. Naravno, treba voditi računa o jedinstvenoj vremenskoj osi za sve objekte. Takođe, u poljima za depresiju se upisuje nula, pošto nije poznata.

## PODEŠAVANJE GRANICA

Moguće je odabratи jednu od šest mogućnosti: bez granice (*No boundary*), granica sa jednom linijom (*One line*), granica sa paralelnim linijama (*Parallel lines*), ugao granica (*Angle*), granica tri linije (*Three lines*) i četiri linije (*Four lines*), [slika 13](#). Rešenje se dobija na osnovu metode ogledalnih slika. Više o ovoj metodi za svaki tip granice moguće je pronaći u [4] ili [6], ili u drugom delu ovog teksta.

- Three Lines -

Referent well  
-- Choose --

α

**Slika 13.** Dodatna polja koja se pojavljuju prilikom odabira tipa granice

Izborom bilo koje opcije za granicu (osim za izbor bez granice) pojavljuju se dodatna polja *Referent well* i  $\alpha$  ([slika 13](#)). U polju *Referent well* bira se bunar (od svih unetih u tabeli *Define new well*) u odnosu na koji su date udaljenosti granica. U polju  $\alpha$  unosi se vrednost ugla između linije granice i horizontale.

Kada je izabran referentni bunar u zavisnosti od tipa granice pojavljuju se različita polja, [slike 14](#).

**BOUNDARY**

- One Line -

Referent well: Well  
Distance to Well: LINE 1  
Boundary type: Constant potential

a

Slika 14. a) Izgled dela za podešavanje granica kada je tip granica sa jednom linijom

**BOUNDARY**

- Parallel Lines -

Referent well: Well  
Distance to Well: LINE 1  
Boundary type: Constant potential

a

Distance to Well: LINE 2  
Boundary type: Constant potential

Maximal distance of fictive wells:

Slika 14. b) Izgled dela za podešavanje granica kada je tip granica sa paralelnim linijama

**BOUNDARY**

- Angle -

Referent well: Well  
Distance to Well: LINE 1  
Boundary type: Constant potential

a

Distance to Well: LINE 2  
Boundary type: Constant potential

$\beta$

Slika 14. c) Izgled dela za podešavanje granica kada je tip ugao granica

**BOUNDARY**

- Three Lines -

Referent well: Well  
Distance to Well: LINE 1  
Boundary type: Constant potential

a

Distance to Well: LINE 2  
Boundary type: Constant potential

Distance to Well: LINE 3  
Boundary type: Constant potential

Maximal distance of fictive wells:

Slika 14. d) Izgled dela za podešavanje granica kada je tip granica sa tri linije

BOUNDARY

- Four Lines -

Referent well	Distance to Well	Boundary type
Well	LINE 1	Constant potential
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="button"/>
LINE 2	Distance to Well	Boundary type
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="button"/>
LINE 3	Distance to Well	Boundary type
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="button"/>
LINE 4	Distance to Well	Boundary type
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="button"/>
Maximal distance of fictive wells		<input type="text"/>

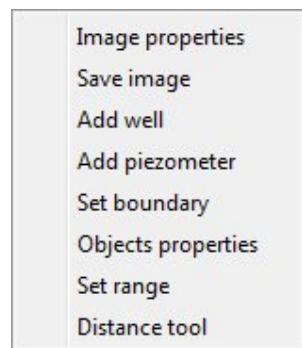
Sl

Slika 14. e) Izgled dela za podešavanje granica kada je tip granica sa četiri linije

U poljima *Distance* unosi se udaljenost granice do referentnog bunara. Za svaku graničnu liniju potrebno je odabratи da li je ona granica konstantnog potencijala, ili vodonepropusna granica. Kada postoji više preslikavanja (granica sa paralelnim linijama, granica tri linije i četiri linije) postoji i polje *Maximal distance of fictive well* koje referiše na to kolika je maksimalna moguća udaljenost fiktivnih bunara od referentnog bunara. Time se zadaje broj preslikavanja, posredno, uticaj najudaljenijeg preslikanog (fiktivnog) bunara na realni objekat.

## GRAFIČKI PRIKAZ KARTE

U ovom delu se prikazuje raspored bunara, pijezometara i granica na karti. U donjem desnom uglu uvek je prikazan razmernik. Ovaj deo takođe omogućava interakciju mišem i to povlačenje (*drag*), uvećavanje, ili umanjenje (*zoom*) i desni klik. Desnim klikom na grafički prikaz karte pojavljuje se meni, **slika 15**, u kome se nalaze opcije za: podešavanja slike (*Image properties*), snimanje slike (*Save image*), dodavanje bunara (*Add well*), dodavanje pijezometra (*Add piezometer*), postavljanje granice (*Set boundary*), opcije prikaza (*Objects properties*), domen slike (*Set range*), alatka za merenje udaljenosti (*Distance tool*). U nastavku će biti objašnjeno šta se dešava klikom na svaku od ovih opcija.



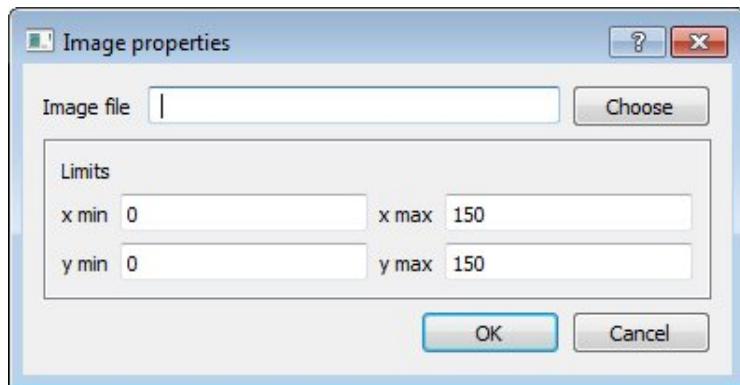
Slika 15. Meni koji se dobija desnim klikom na grafički prikaz karte

Klikom na:

■ **Image properties**

Dobija se prozor kao na **slici 16**. U polju *Image file* unosi se lokacija fajla u kome se nalazi skenirana, ili satelitska mapa lokacije. Ovo je moguće uraditi i klikom na dugme *Choose* i

izabiranjem željenog fajla. U poljima  $xmin$  i  $ymin$  unose se koordinate donje leve tačke karte, a u poljima  $xmax$  i  $ymax$  unose se koordinate gornje desne tačke karte.



Slika 16. Prozor *Image properties*

Napomena: Istovetni prikaz karte kao u kartici VISUALIZATION se postiže otvaranjem menija **image properties** i duplim levim klikom na postojeću kartu. Time se postiže upisivanje novih koordinata u poljima  $xmin$ ,  $ymin$ ,  $xmax$  i  $ymax$ . Snimanjem pri zatvaranju fajla, nove koordinate ostaju zapamćene. Prilikom ponovnog otvaranja datoteke, karte su postavljene sa svojim koordinatama. Poslednje podešene koordinate se pozivaju na prethodno opisani način.

Ukoliko smo ucitali kartu, pa hocemo da je sklonimo, dovoljno je obrisati naziv slike iz *image properties*.

#### ■ **Save image**

Dobija se prozor za snimanje grafičkog prikaza u JPG formatu.

#### ■ **Add well**

Dobija se prozor kao na [slici 17](#), u koji se unosi novi bunar. Kada se klikne na OK ovi podaci su direktno ubačeni u tabelu *Define new well*. Kada je ovaj prozor aktivan koordinate je moguće dobiti i duplim (levim) klikom na grafički prikaz.



Slika 17. Prozor *Add well*

#### ■ **Add piezometer**

Dobija se prozor kao na [slici 18](#), u koji se unosi novi pijezometar. Kao i za bunar ovi podaci se direktno ubacuju u tabelu *Define new piezometer*.



Slika 18. Prozor *Add piezometer*

#### ■ **Set boundary**

Dobija se prozor preko kojeg je moguće postaviti granične linije. Izgled ovog prozora zavisi od tipa granice.

### ■ Object properties

Dobija se prozor u kome se podešavaju boje i veličine bunara, pijezometara i graničnih linija.

### ■ Set range

Dobija se prozor u kome se podešava domen koji se prikazuje.

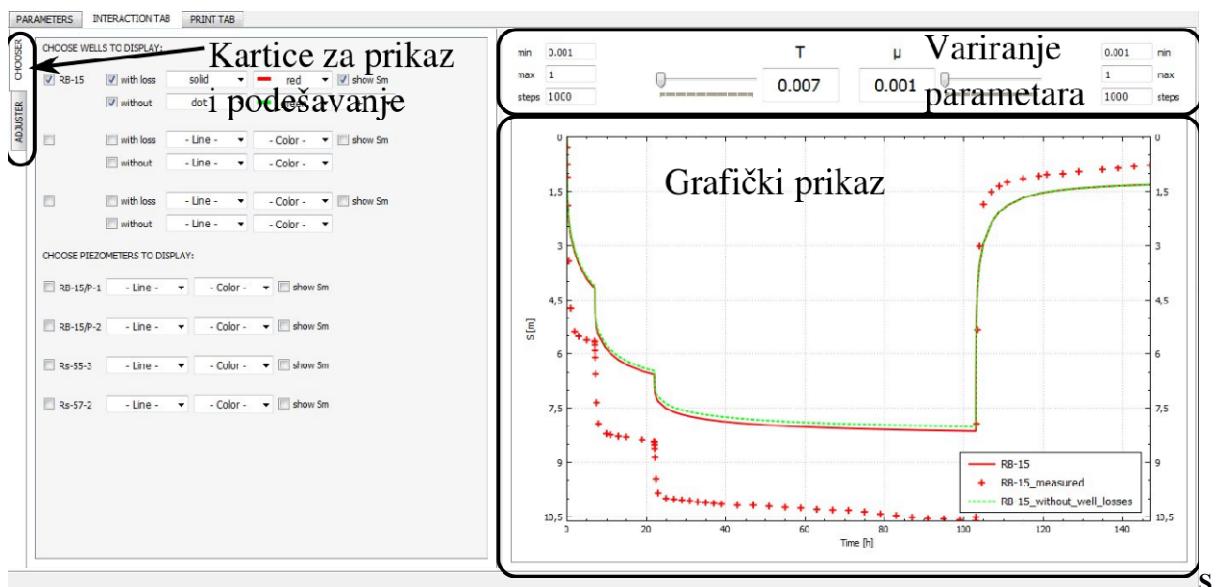
### ■ Distance tool

Aktivira se alatka za merenje distance.

## Kartica INTERACTION TAB

Kartica INTERACTION TAB služi za kalibraciju parametara modela i za grafički prikaz izmerenih i izračunatih depresija u bunarima i pijezometrima. Ona se sastoji od (slika 19):

- kartice za odabir objekta grafičkog prikaza,
- kartice za podešavanje razdaljine granice i gubitaka u bunaru,
- dela za variranje koeficijenta vodoprovodnosti izdani ( $T$ ) i specifične izdašnosti izdani ( $\mu$ ),
- grafičkog prikaza.



Slika 19. Kartica INTERACTION TAB

**Kartica za prikaz izmerenih i izračunatih depresija (Chooser)** služi za odabir bunara i pijezometara čiji će rezultati biti prikazani na delu za grafički prikaz. Za svaki bunar (koji je unet na kartici PARAMETERS) imamo mogućnost da izaberemo prikaz: sa gubicima u bunarima (*with loss*), bez gubitaka u bunaru (*without*), kao i izmerenih rezultata (*show Sm*). Za grafikon sa gubicima u bunaru i bez gubitaka možemo promeniti izgled linije kao i boju. Grafikon izmerenih vrednosti je tačkast, pri čemu oblik tačke možemo izabrati dok je boja ista kao i za grafikon sa gubicima u bunarima. Slično važi i za pijezometre, samo što kod njih ne postoje gubici.

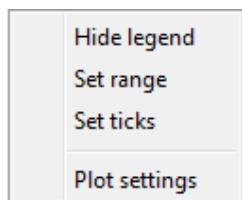
**Kartica za podešavanje razdaljine granice i gubitaka u bunaru (Adjuster)** služi za dodatno podešavanje udaljenosti granice od referentnog bunara i gubitaka u bunaru (samo prve vrednosti A i B u tabeli *Enter data for well*).

Napomena: Ukoliko se smatra da se vrednosti A i B menjaju tokom vremena, one se unose u tabeli zajedno sa ostalim vremenskim podacima bunara.

Napomena: Posle pomeranja slajdera, tokom kalibracije modela, promena jeste zabeležena u podacima, ali **Parameter tab** ipak prikazuje staru vrednost. Pošto vrednosti koje se vide u **Parameter tabu** nisu one koje su u tom momentu u podacima, ta vrednost (početna, pre pomeranja slajdera) je crvene boje. Ako se želi da se u **Parameter tabu** zapamti vrednost koja je dobijena pomeranjem slajdera, treba da u se polju za granicu u **Parameter tabu** pritisne *Escape*. Ako se zeli da se podaci vrati na stanje pre pomeranja slajdera, u polju za granicu u **Parameter tabu** se pritisne *Enter*.

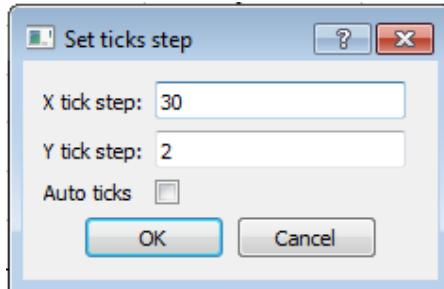
U **delu za variranje parametara** menjaju se vrednosti koeficijenta vodopravodnosti izdani i specifične izdašnosti izdani.

**Grafički prikaz** prikazuje grafike (koji su izabrani na *Chooser* kartici) depresija u zavisnosti od vremena. Ukoliko je u meniju *Results→Set static level* omogućeno da se rezultati posmatraju u odnosu na statički nivo desna osa će pokazivati nivo u metrima nadmorske visine. Ovaj deo takođe omogućava interakciju mišem i to povlačenje (*drag*), uveličavanje ili umanjenje (*zoom*), klik na određeni grafik pri čemu će biti selektovan koji je grafik u legendi, kao i desni klik. Desnim klikom na grafički prikaz karte pojavljuje se meni, [slika 20](#), u kome se nalaze opcije za: sakrivanje/postavljanje legende (*Hide/Show legend*), postavljanje domena (*Set range*), podešavanje markera ose (*Set ticks*) i dodatno podešavanja grafikona (*Plot settings*).



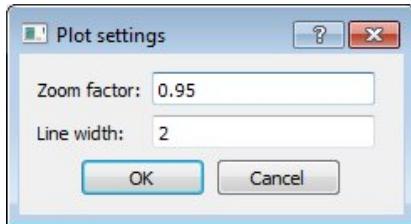
Slika 20. Meni koji se dobija desnim klikom na grafički prikaz grafikona

Klikom na *Hide/Show legend* sakriva/pojavljuje se legenda. Klikom na *Set range* pojavljuje se prozor u kome se namešta domen grafikona. Klikom na *Set ticks* pojavljuje se prozor [slika 21](#). *X tick step* predstavlja interval između markera na x-osi, dok je *Y tick step* interval markera na y-osi. Ukoliko se štiklira opcija *Auto ticks* program automatski određuje markere.



Slika 21. Prozor Set ticks

Klikom na *Plot settings* pojavljuje se prozor, [slika 22](#), u kome se podešava faktor zumiranja i debljina linija grafikona.

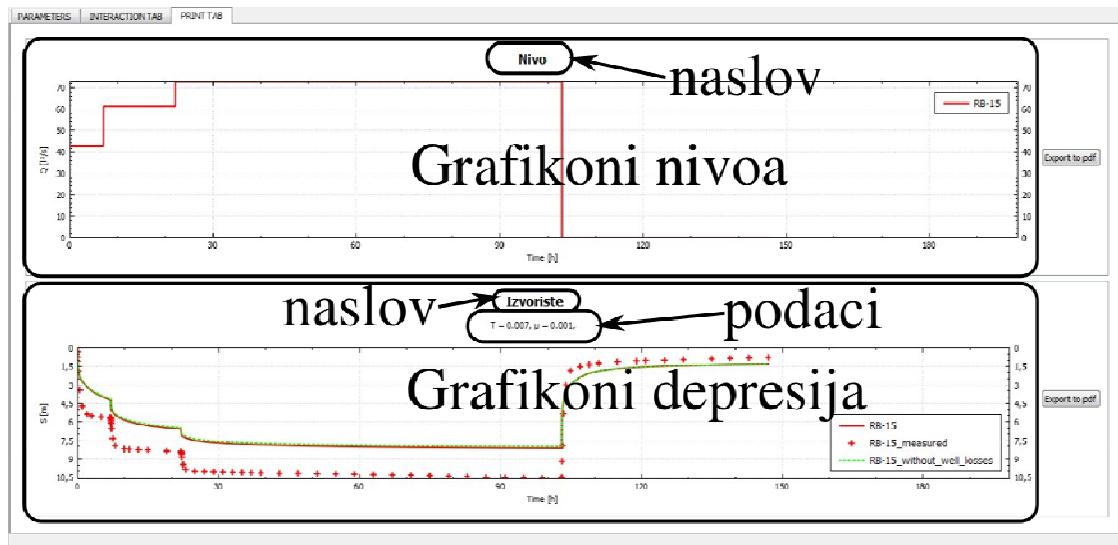


Slika 22. Prozor Plot settings

## Kartica PRINT TAB

Kartica PRINT TAB služi za štampanje grafikona u fajl. Sastoji se od ([slike 23](#)):

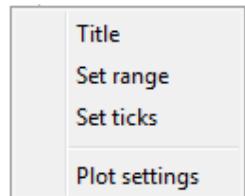
- dela koji prikazuje grafikone proticaja (hidrogram),
- dela koji prikazuje grafikone depresija (nivogram).



Slika 23. Kartica PRINT TAB

Pored svakog od ovih delova nalazi se dugme *Export to pdf* koje snima sliku u fajl sa ekstenzijom pdf.

Desnim klikom na deo sa grafikonima nivoa dobija se meni kao na [slici 24](#).



Slika 24. Meni koji se dobija desnim klikom na deo sa grafikonima nivoa

Klikom na *Title* aktivira se prozor u koji se unosi naslov grafika. Klikom na *Set range* aktivira se prozor za unošenje domena. Klikom na *Set ticks* aktivira se prozor kao na [slici 21](#). Klikom na *Plot settings* aktivira se prozor na [slici 22](#).

Desnim klikom na deo sa grafikonima depresija dobija se meni kao na [slici 25](#).



Slika 25. Meni koji se dobija desnim klikom na deo sa grafikonima depresija

Klikom na *Show data* prikazuje se prozor kao na [slici 26](#), gde se bira šta od rezultata želimo da prikažemo na grafikonu.



Slika 26. Prozor Show data

## Kartica VISUALIZATION

Kartica VISUALIZATION služi za prikaz izolinija i strujnica. Sastoji se od (slika 27):

- dela za računanje vrednosti,
- kartice za podešavanje izolinija,
- kartice za podešavanje strujnica,
- dela za grafički prikaz izolinija i strujnica.

### RAČUNANJE ELEMENATA PRIKAZA

U delu za računanje sa  $X_{min}$ ,  $X_{max}$ ,  $Y_{min}$ ,  $Y_{max}$  podešava se veličina pravougaonika u kom se izračunavaju vrednosti potrebne za prikazivanje izolinija i strujnica. U ovom delu treba biti pažljiv jer će izolinije i strujnice biti prikazane samo u ovom pravougaoniku. Ovaj pravougaonik se deli na više manjih i u centru svakog je izračunata vrednost depresije u svakom vremenskom trenutku. U delu *Division* podešava se podela velikog pravougaonika na male. Klikom na dugme *Calculate* izračunavaju se vrednosti u centrima malih pravougaonika. Takođe, dugme *Calculate* postaje neaktivno. Dugme *Calculate* postaje ponovo aktivno ako je promenjena neka od vrednosti  $X_{min}$ ,  $X_{max}$ ,  $Y_{min}$ ,  $Y_{max}$ ,  $Division X$  ili  $Y$ . Duplim klikom na delu za grafički prikaz, u polja  $X_{min}$ ,  $X_{max}$ ,  $Y_{min}$ ,  $Y_{max}$  se unose trenutne koordinate grafičkog prikaza.



Slika 27. Kartica VISUALIZATION

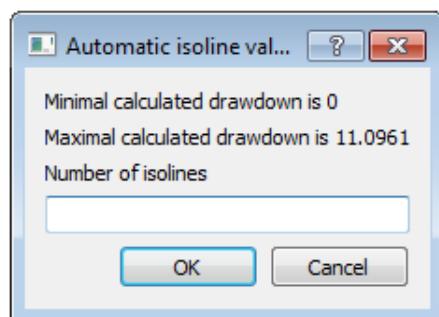
## PODEŠAVANJA IZOLINIJA

Kartica za podešavanje izolinija, slika 28, se sastoji iz dugmeta za izbor da li će prikazani rezultati biti u formi depresija ili nivoa (ukoliko je u *Results → Set static level* onemogućen statički nivo i ovde će biti onemogućen), polja za unošenje vrednosti izolinija *Isoline values*, dugmeta za automatsko generisanje vrednosti izolinija *Automatic*, liste unesenih izolinija, dugmeta *Show*, dugmića za vremensku interakciju (*First*, *Previous*, *Play*, *Next*, *Last*), i polja za direktni odabir vremenskog trenutka *Time*.



Slika 28. Kartica za podešavanje izolinija

Polje za unošenje izolinija i dugme za automatsko generisanje vrednosti izolinija su isključeni dokle god ne postoje rezultati (koji se dobijaju klikom na dugme *Calculate* u delu za računanje). Vrednost uneta u polje (*Isoline values*) pritiskom na taster *Enter* unosi se u listu. Klikom na dugme *Automatic* pojavljuje se prozor kao na slići 29. Klikom na *OK* automatski generisane vrednosti izolinija se unose u listu.



Slika 29. Prozor Automatic isoline values

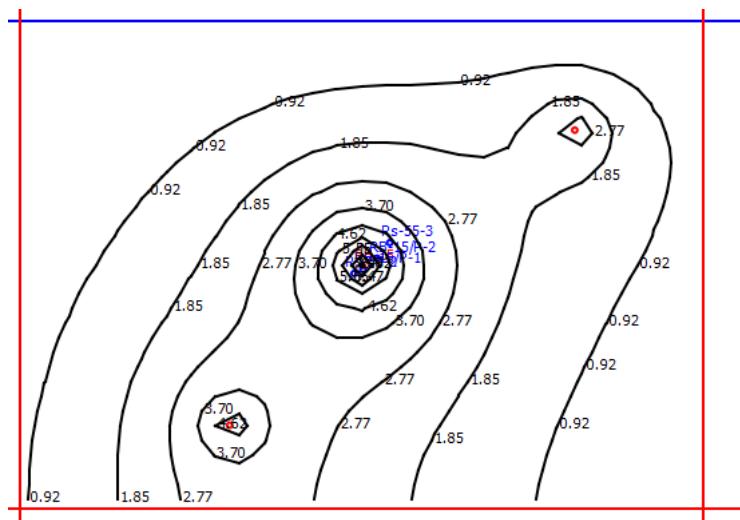
Vrednost izolinije iz liste je moguće izbaciti klikom na nju i potom pritiskanjem tastera *Delete*. Dugme *Show* je isključeno dokle god ne postoji barem jedna izolinija. Klikom na ovo dugme prikazuju se izolinije u delu za grafički prikaz.

Dugme *First* vraća prikaz na prvi vremenski trenutak, dugme *Previous* vraća prikaz na prethodni vremenski trenutak, dugme *Play* prikazuje redom svaki vremenski korak, dugme *Next* postavlja prikaz na sledeći vremenski korak, dugme *Last* postavlja prikaz na poslednji vremenski korak. Prikaz određenog vremenskog koraka je moguće postići i preko *spinbox-a*.

Željeni vremenski vremenski presek je moguće postaviti na sledeći način: Izračunaju se izolinije klikom na *Calculate* u okviru **Visualization tab**. Zatim se klikne *show*, pa se pređe u **Interaction tab**, ili **Print tab**, gde se dva puta klikne (levi klik) bilo gde u okviru grafika. U **Visualization tabu**

je sada izabran postojeći vremenski korak najbliži onome što je kliknut i dat odgovarajući grafički prikaz izolinija.

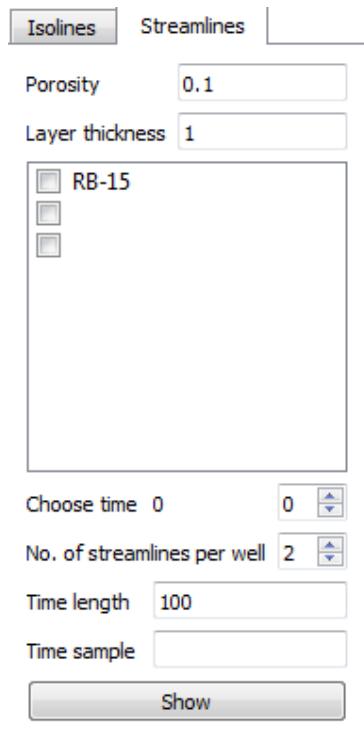
Izolinije se računaju na osnovu rezultata koji su dobijeni u delu za računanje korišćenjem algoritma *marching squares*. Glatkost linija zavisi od podele (*Division*) u delu za računanje. Primer grafičkog prikaza izolinija dat je na slici 30.



Slika 30. Primer prikaza izolinija

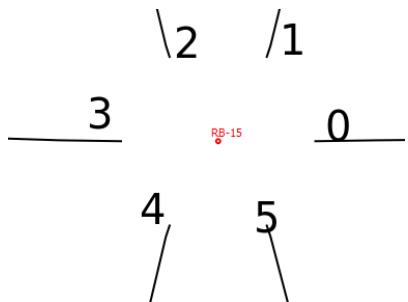
## **PODEŠAVANJE STRUJNICA**

Da bi dobili strujnice potrebne su nam informacije o poroznosti sredine i debljini sloja. **Kartica za podešavanje strujnica**, slika 31, sastoji se od polja za unos poroznosti *Porosity* i debljine sloja *Layer thickness*, liste u kojoj se štikliraju bunari za koje posmatramo strujnice, polja za odabir vremenskog koraka (*Choose time*), polja za odabir broja strujnica za svaki odabrani bunar (*No. Of streamlines per well*), polja za unos vremenskog trajanja strujnica (*Time length*), polja za unos vremenskog koraka za strujnice (*Time sample*) i dugmeta za prikazivanje (*Show*). Vreme uneseno u (*Time length* i *Time sample*) je u jedinicama koje su specificirane u *Time unit settings* (slika 5).



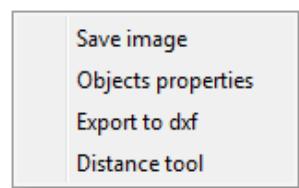
Slika 31. Kartica za podešavanje strujnica

Strujnice na grafičkom prikazu idu do ivice bunara (krug sa zadatim poluprečnikom). Pri čemu su raspoređene na način prikazan na slici 32. Ideja je da nulta strujnica uvek kreće ka sredini bunara, dok ostale kreću pod uglom 360/broj strujnica.



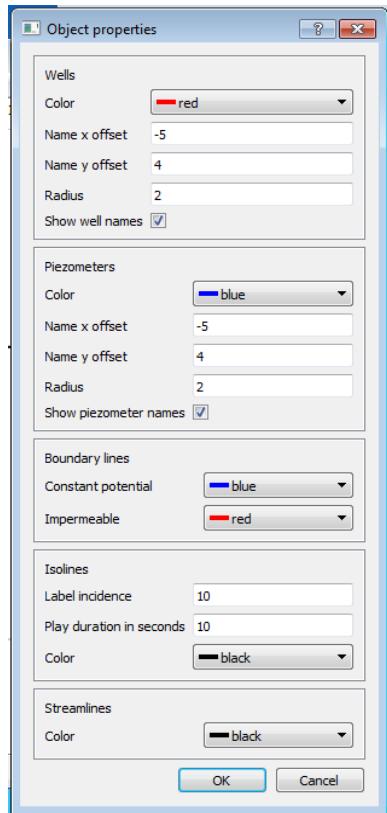
Slika 32. Raspored strujnica oko bunara kada je izabrano da ih ima šest

Na grafičkom prikazu postoji interakcija sa mišem i to povlačenje (*drag*), uveličavanje ili umanjenje (*zoom*) i desni klik. Desnim klikom na grafički prikaz pojavljuje se meni kao na slici 33.



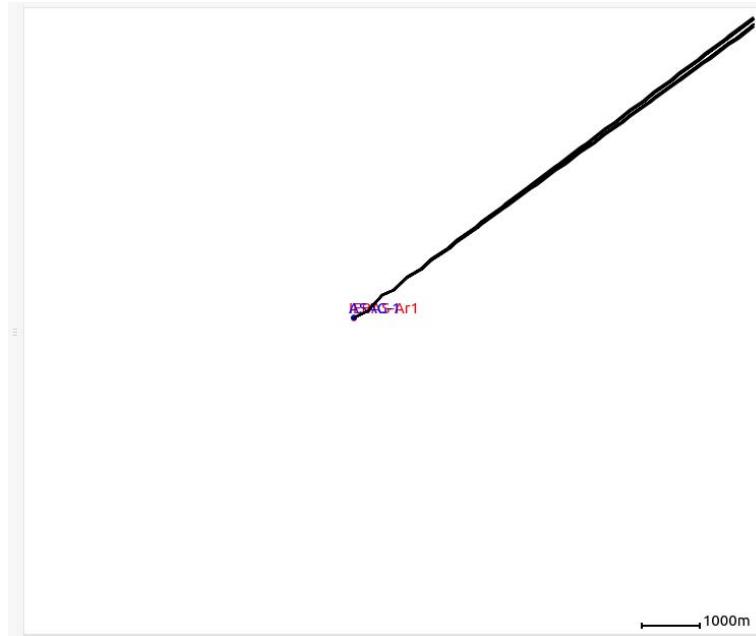
Slika 33. Meni koji se pojavljuje na desni klik na delu za grafički prikaz

Klikom na *Save image* dobijamo dijalog za snimanje slike koja je trenutno prikazana na grafičkom prikazu. Klikom na *Object properties* dobija se prozor kao na slici 34. U njemu se na isti način kao i na *Parametars tab*-u podešavaju boje i veličine bunara, pijezometara, graničnih linija, boje izolinija i strujnica. Polje *Label incidence* odnosi se na učestalost oznaka izolinija, što je ovaj broj veći to će manje biti oznaka izolinija. Polje *Play duration in seconds* označava dužinu trajanja Play prikaza.



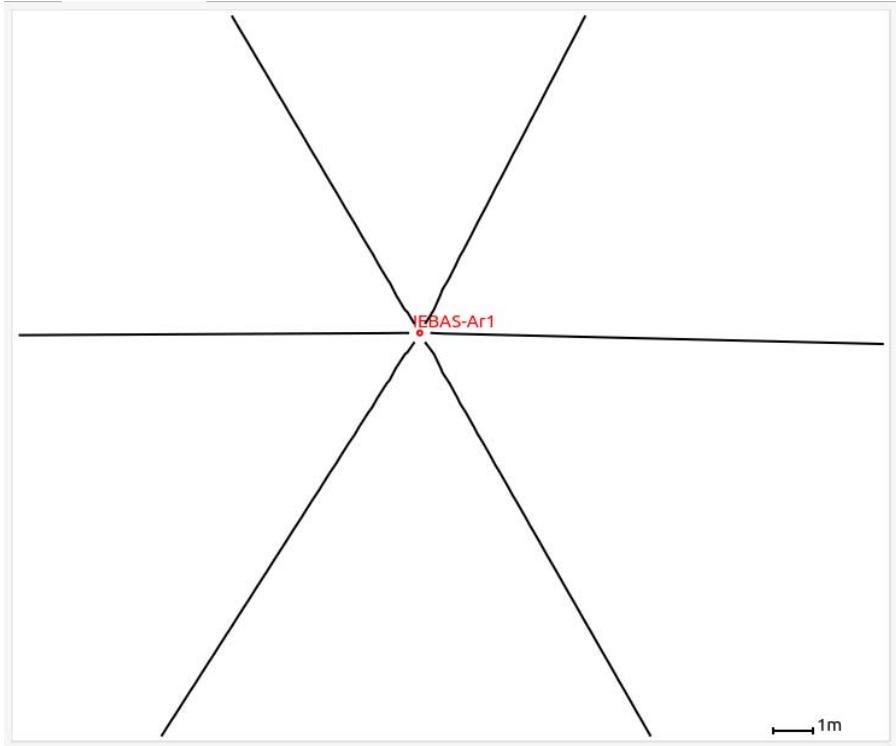
Slika 34. Prozor Object properties

Zbog načina računanja strujnica mogući su problemi ukoliko je bunar mali, a oblast u kojoj se računa velika (nekoliko redova veličina veća od bunara). Tada je moguće dobiti strujnice kao na slici 35.



Slika 35. Primer lošeg izračunavanja strujnica

Jedan način kojim je najčešće moguće prevazići profinjavanjem izračunavanja (povećati vrednosti *Division X* i *Y*).



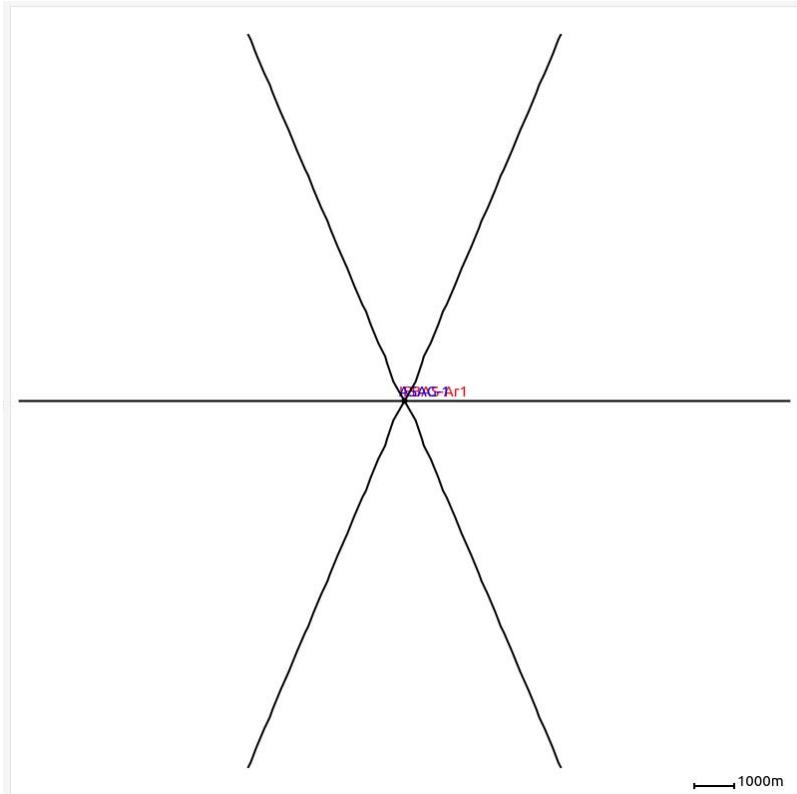
Slika 36. Izračunavanjem na manjem opsegu dobijamo dobar rezultat.

Drugi način kojim je uvek moguće prevazići ovaj problem je dovoljno smanjivanje opsega u kome se računaju strujnice (slika 36). Obratimo pažnju da je razmernik na slici 35 pokazuje hiljadu puta veću vrednost od razmernika na slici 36.

Nažalost ponekad je potrebna predstaviti strujnice u velikom domenu (stoga otpada drugi način), a profinjavanjem se ne dobijaju zadovoljavajući rezultati. Tada je potrebno postaviti bunar u centar oblasti računanja i koristiti neparnu podelu. Odnosno, za oblast računanja ( $X_{min}$ ,  $X_{max}$ ,  $Y_{min}$ ,  $Y_{max}$ ) treba uzeti

$$\begin{aligned} X_{min} &= X_b - X_d, \\ X_{max} &= X_b + X_d, \\ Y_{min} &= Y_b - Y_d, \\ Y_{max} &= Y_b + Y_d, \end{aligned}$$

pri čemu je  $(X_b, Y_b)$  pozicija bunara,  $X_d$  polovina želenog domena po X,  $Y_d$  polovina želenog domena po Y. Takođe za *Division X* i *Y* potrebno je staviti neparne brojeve. Na ovaj način dobijamo dobro rešenje (slika 37).



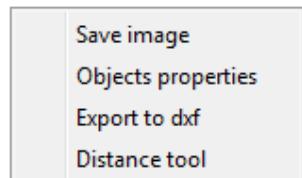
Slika 37. Rešenje dobijeno postavljanjem bunara u centar oblasti računanja

Ukoliko postoji više bunara pri čemu profinjenje ne daje rezultat i smanjenje oblasti nije opcija, potrebno je za svaki bunar posebno naći strujnice eksportovati u *dxf* format i potom ih u AutoCAD-u spojiti.

## GRAFIČKI PRIKAZ IZOLINIJA I STRUJNICA

U ovom delu se prikazuje raspored izolinija i strujnica, u kombinaciji sa kartom, formiranom u delu Kartica PARAMETERS > Prikaz na karti.

U donjem desnom uglu uvek je prikazan razmernik. Ovaj deo takođe omogućava interakciju mišem i to povlačenje (*drag*), uveličavanje, ili umanjenje (*zoom*) i desni klik. Desnim klikom na grafički prikaz karte pojavljuje se meni, [slika 38](#) u kome se nalaze opcije za: snimanje slike (*Save image*), za eksportovanje (*Export to dxf*), i alatka za merenje udaljenosti (*Distance tool*).

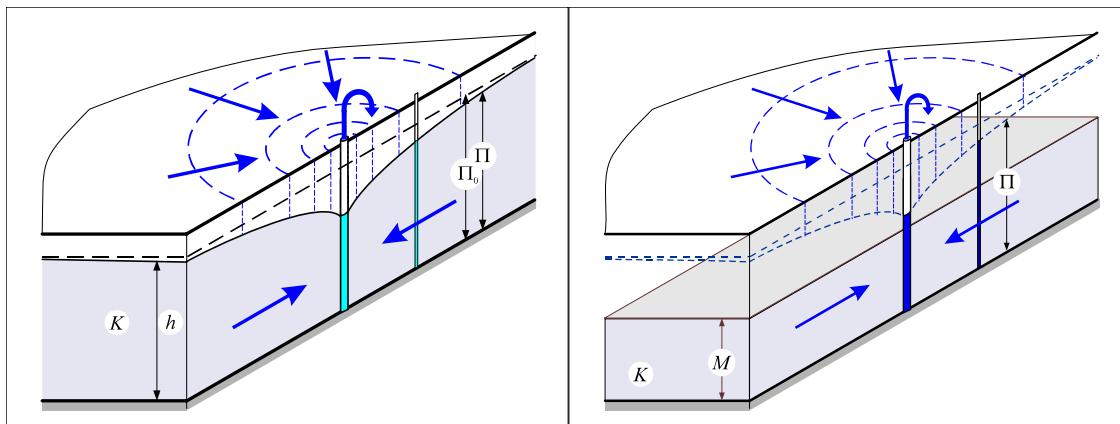


Slika 38. Meni koji se dobija desnim klikom na grafički prikaz karte

Po izvršenom podeševanju karte za prikaz izolinija i strujnica, nove koordinate se duplim levim klikom se prenose i pamte u **deo za za računanje**. Postupak prenošenja novih koordinata je opisan u delu kartice PARAMETERS > Prikaz na karti.

## TEORIJSKE OSNOVE - JEDNAČINA STRUJANJA PODZEMNIH VODA PREMA BUNARU (THEIS, 1935)

Diferencijalnu jednačinu strujanja podzemnih voda prema bunaru je izveo Charles Theis, 1935. godine. Jednačina kojom se opisuje strujanje prema bunaru u izdani sa slobodnim nivoom je opštija, slika 39a, dok se strujanje pod pritiskom, slika 39b, može posmatrati kao poseban slučaj prethodnog.



Slika 39. a) strujanje prema bunaru sa slobodnim nivoom, b) strujanje prema bunaru pod pritiskom

Za izvođenje jednačine strujanja sa slobodnim nivoom, uvode se sledeće hipoteze:

- porozna sredina je šematizovana modelom kontinuma, kao homogena, izotropna, neograničenog prostiranja, posmatrano u planu,
- podina vodonosnog sloja je horizontalna, a izdan je pre početka crpenja konstantne debeljine,
- strujanje podzemnih voda je u skladu sa zakonom Darsija,
- zanemaruje se vertikalna komponenta strujanja, odnosno, primenjuje se hipoteza Dipuia,
- strujanje prema bunaru je radijalno, posmatra se kao ravansko u planu.

Uz prethodnu linearizaciju i zanemarivanje elemenata vertikalnog bilansa (infiltacija, evapotranspiracija, vertikalni doticaj/oticaj iz susednih slojeva), parcijalna diferencijalna jednačina u polarnim koordinatama je:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S}{\partial r} = \frac{1}{a} \frac{\partial S}{\partial t} \quad (1)$$

gde je:

$S$  – depresija u posmatranoj tački strujnog polja, [L],

$r$  – udaljenje od koordinatnog početka (centra bunara), [L],

$a$  - koeficijent nivoprovodnosti izdani, [ $L^2 T^{-1}$ ]:

$$a = \frac{K h}{s} \quad (2)$$

$K$  – koeficijent filtracije izdani, [ $LT^{-1}$ ],

$h$  – debeljina izdani, konstantna veličina, [L],

$\varepsilon$  – specifična izdašnost izdani sa slobodnim nivoom (efektivna poroznost), [–].

Za uslove strujanja pod pritiskom, [slika 39](#), uvođe se još i sledeće pretpostavke:

- vodonosni sloj je horizontalan, konstantne debljine ( $M = Const.$ ),
- podina i povlata sloja su vodonepropusne konture,
- strujanje je pod pritiskom u svim tačkama strujnog polja i u svakom trenutku.

Analogno prethodnom slučaju dobija se:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial S}{\partial r} = \frac{1}{a^*} \cdot \frac{\partial S}{\partial t} \quad (3)$$

gde je:

$a^*$  - koeficijent pijezoprovodnosti izdani, [ $L^2 T^{-1}$ ]:

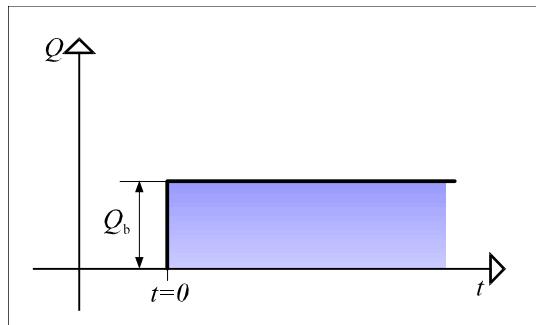
$$a^* = \frac{KM}{\mu} \quad (4)$$

$T$  – koeficijent vodoprovodnosti izdani, [ $L^2 T^{-1}$ ],

$M$  – debljina akvifera izdani, [L],

$\mu$  - specifična izdašnost izdani pod pritiskom, [–].

Theis je dao i analitičko rešenje diferencijalne jednačine, koje je našlo veliku praktičnu primenu. Ovim rešenjem se razmatra slučaj crpenja iz usamljenog savršenog bunara, sa konstantnim proticajem, koji je trenutno počeo, [slika 40](#).



Slika 40. Hidrogram crpenja iz bunara, sa trenutnim uključenjem i konstantnim proticajem ( $Q_b$ )

Prepostavljeni su sledeći granični i početni uslovi:

Granični uslovi:

$$\text{za } r \rightarrow 0 \text{ i } t > 0 : \quad \frac{Q_b}{2\pi T} = \lim_{r \rightarrow 0} \left( r \frac{\partial \Pi}{\partial r} \right) \quad (5)$$

Proticaj iz bunara ( $r \rightarrow 0$ ) u periodu crpenja ( $t > 0$ ) je konstantan ( $Q_b = Const.$ ).

$$\text{za } r \rightarrow \infty \text{ i } t > 0 : \quad S = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial r} = 0; \quad \Pi(\infty, t) = \Pi_0 \quad (6)$$

Na beskonačnom udaljenju od bunara ( $r \rightarrow \infty$ ), na početku i tokom vremena crpenja iz njega ( $t > 0$ ), sa proticajem  $Q_b = Const.$ , depresija je nula ( $S = 0$ ), pijezometarski nivo izdani je horizontalan ( $\partial S / \partial r = 0$ ) i neporemećen (jednak je nivou pre početka crpenja, početnom nivou,  $\Pi(\infty, t) = \Pi_0$ ).

Početni uslov:

$$\text{za } t = 0; \quad S = 0; \quad \Pi(r, 0) = \Pi_0 \quad (7)$$

U periodu pre početka crpenja ( $t < 0$ ), depresija je nula ( $S = 0$ ), a pijezometarski nivo u svim tačkama strujnog polja je isti,  $\Pi(r, 0) = \Pi_0$ .

Za gornje granične i početne uslove, Tajs je 1935. godine dao analitičko rešenje u sledećem obliku:

$$S = \frac{Q_b}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (8)$$

gde je:

$S$  – depresija, [m],

$Q_b$  – proticaj bunara, [ $L^3 T^{-1}$ ],

$\pi$  – Ludolfov broj (3.141592...),

$T$  – koeficijent vodoprovodnosti izdani, [ $L^2 T^{-1}$ ]

$u$  - bezdimenzionalni parametar, [-]:

$$u = \frac{r^2 \mu}{4\pi t} \quad (9)$$

$r$  - udaljenost posmatrane tačke od ubunaru,

$\mu$  - specifična izdašnost izdani, [-],

$t$  - vreme od početka crpenja, [T],

$y$  – varijabla integrala.

Eksponencijalni integral u gornjoj jednačini se često u stručnoj literaturi označava kao *bunarska funkcija*,  $W(u)$  i piše se kao:

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-y}}{y} dy = -E_i(-u) \quad (10)$$

Bunarska funkcija se može izraziti i u obliku reda:

$$W(u) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots \quad (11)$$

gde je: 0.577215665... - veličina, u matematici poznata kao Ojlerova konstanta.

## SUPERPOZICIJA STRUJANJA

Složena radikalna strujanja, kao što su rad bunara sa promenljivim proticajem, rad grupe bunara sa konstantnim ili promenljivim proticajima, mogu se izraziti algebarskim sabiranjem jednačina osnovnih, elementarnih strujanja. To podrazumeva prethodno razlaganje, dekomponovanje, složenog strujanja na skup elementarnih (koja se izražavaju jednačinom Theis-a, ili Dupuit-a), a zatim sabiranje uticaja (depresije) tako dobijenih elementarnih strujanja u dатој tački strujnog polja i u datom trenutku vremena.

Znači, složeno strujanje prema grupi bunara se može opisati sabiranjem jednačina za strujanje prema svakom pojedinačnom bunaru.

Ograničenje primene ove metode je u tome što se može sprovesti samo u uslovima ako se komponentna strujanja odvijaju u izdani istih filtracionih karakteristika, istog prostiranja i iste granične uslove.

## METODA OGLEDALNIH SLIKA (METODA PRESLIKAVANJA)

Osnovni problem primene superpozicije strujanja je u određivanju graničnih uslova. Strujanje koje odgovara zbiru dva prostija strujanja ima drugačije granične uslove od graničnih uslova komponentnih strujanja. Ovaj problem se ne postavlja jedino ako je strujno polje neograničeno, a u unutrašnjosti strujnog polja postoje samo tzv. tačkasti izvori i ponori.

U slučajevima, kada se realne granice strujne oblasti mogu šematizovati kao vertikalne ravne površi (ili prave linije posmatrano u ravnini), takva strujanja se mogu rešavati kao strujanja u neograničenoj izdani, "zamenjujući" realne granice određenim brojem fiktivnih bunara i superpozicijom strujanja realnog i fiktivnih bunara.

Ova metoda poznata je u inženjerskoj praksi kao "metoda preslikavanja", ili "metoda ogledalnih slika". Suština ove metode sastoji se u tome da se uvođenjem fiktivnih bunara (uz istovremeno uklanjanje granica strujnog polja), ne remeti realna slika strujanja prema realnom bunaru.

Kao ilustracija primene metode preslikavanja, daje se primer strujanja prema usamljenom savršenom bunaru u homogenoj izdani, koji se nalazi pored granice, koja se može šematizovati kao ekvipotencijalna linija u planu, odnosno vertikalna ekvipotencijalna ravan u prostoru. U praksi je to slučaj strujanja podzemnih voda prema bunaru, koji se nalazi pored reke, ili jezera, čija se obala može šematizovati pravolinijskom konturom, a kontakt sa poroznom sredinom je bez dopunskih parazitskih hidrauličkih gubitaka.

Za ovako šematizovanu sredinu, strujna slika za "realni" deo strujne oblasti je prikazana na [slici 41a](#). Ista slika u strujnoj oblasti će se dobiti ako se posmatra strujanje u neograničenoj izdani, za slučaj da je realni bunar (sa proticajem  $+Q$ ) simetrično "preslikan" preko šematizovane granice konstantnog potencijala u fiktivni bunar (istih karakteristika kao realni), sa proticajem  $-Q$ . U ovom slučaju, formiraće se oko oba bunara isti oblik depresionog levka, s tim što će jedan biti konkavan, a drugi konveksan.

Depresija u tački  $P$  predstavlja algebarski zbir depresija,  $S_{Pr}$  i  $S_{Pf}$ , koje su rezultat pojedinačnih uticaja rada navedena dva bunara (realni bunar, sa proticajem  $+Q$ , a fiktivni bunar, sa proticajem  $-Q$ ):

$$S_p = S_{Pr} + S_{Pf} \quad (12)$$

gde su, za iste filtracione karakteristike porozne sredine i trajanje crpenja:

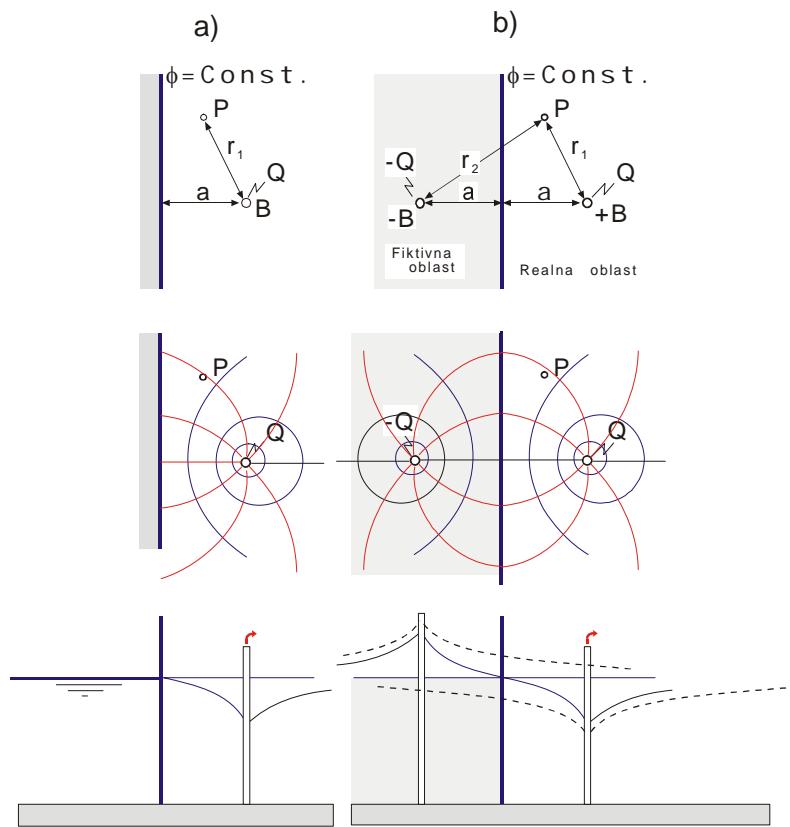
$$S_{Pr} = \frac{Q}{4\pi T} \cdot W(u_{Pr}), \quad u_{Pr} = f(r_1) \quad (13)$$

$$S_{Pf} = -\frac{Q}{4\pi T} \cdot W(u_{Pf}), \quad u_{Pf} = f(r_2) \quad (14)$$

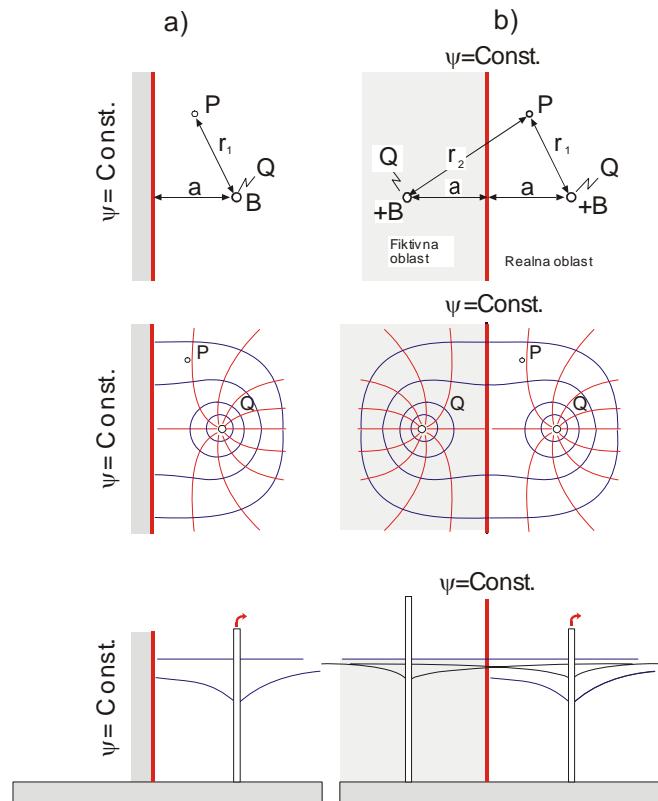
Za slučaj strujanja podzemnih voda prema bunaru pored granice, koja se može šematizovati kao strujna linija (vodoneprepusna granica, odnosno u prostoru je vertikalna strujna površ), fiktivni bunar ima isti znak proticaja kao i realni bunar. Strujna slika u planu se može prikazati kao na [slici 42](#). U ovom slučaju nema napajanja iz pravca granice rasprostranjenja strujanja (konture oblasti), kao u slučaju bunara pored reke.

Depresija u tački  $P$  je zbir depresija,  $S_{Pr}$  i  $S_{Pf}$ , odnosno uticaja navedena dva bunara (realni i fiktivni bunar) u tački  $P$ , sa istim znakom proticaja,  $+Q$ :

$$S_p = S_{Pr} + S_{Pf} \quad (15)$$



Slika 41. Strjuna slika strujanja prema bunaru pored pravolinijske granice ( $\phi = \text{Const.}$ ): a) fizička šema, b) proračunska šema



Slika 42. Strjuna slika strujanja prema bunaru pored pravolinijske granice ( $\psi = \text{Const.}$ ): a) fizička šema, b) proračunska šema

Metoda ogledalnih slika omogućava dobijanje jednačina strujanja prema bunaru (bunarima) za slučaj postojanja jedne, ili više granica rasprostranjenja izdani, koje se mogu šematisovati pravim linijama (u ravni), kao vodonepropusne, ili ekvipotencijalne linije. U većini slučajeva izrazi nisu suviše komplikovani, tako da njihovo rešavanje ne predstavlja veliki problem.

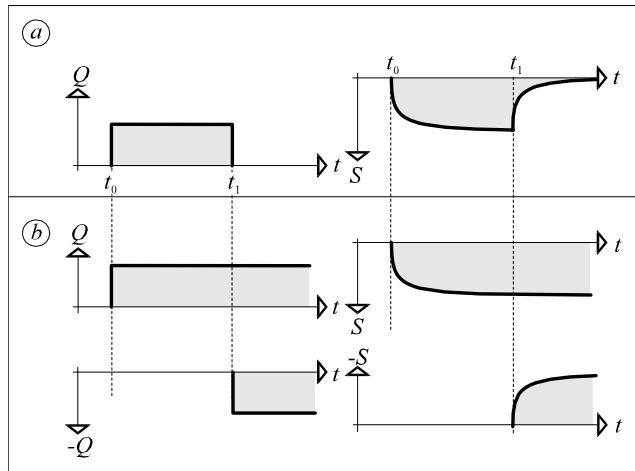
Treba istaći da u slučajevima kada zamena realne oblasti strujanja neograničenom izdani i fiktivnim bunarima ne obezbeđuje istu, ili simetričnu strujnu sliku svakog pojedinačnog bunara (u odnosu na strujnu sliku realnog bunara), ova metoda se ne može primeniti. Ovo je izraženo naročito u slučaju bunara u izdani ograničenoj granicama pod određenim uglom. Rešenja se ne mogu dobiti za slučajeve uglova koji ne dele pun ugao (ugao od  $360^0$ ) celim brojem. Isto tako, uglovi koji dele pun ugao na neparan broj uglova daju rešenja samo za određene slučajeve rasporeda granica.

### STRUJANJE PREMA BUNARU SA PROMENLJIVIM PROTICAJEM

Linearni karakter diferencijalne jednačine omogućava opisivanje radikalnog strujanja podzemnih voda i u uslovima promenljivog proticaja bunara. To se postiže razlaganjem složenog strujanja na skup elementarnih, a zatim algebarskim sabiranjem njihovih analitičkih izraza.

#### Slučaj uključenja i isključenja bunara

Kao jednostavan slučaj će se uzeti primer bunara sa trenutnim uključenjem konstantnog proticaja  $Q_1$  u trenutku  $t_1$  i naglom (trenutnom) promenom proticaja u trenutku  $t_2$ , slika 6. Od vremena  $t_2$ , proticaj bunara je  $Q_2$ . Hidrogram se razlaže na elementarne, za koje pojedinačno važi jednačina Tajsa. Sumarna i elementarne depresije su prikazane na [slici 43](#).



Slika 43. a) Sumarni i b) elementarni (razloženi) hidrogrami i nivogrami, za slučaj naglog uključenja i isključenja proticaja bunara

U periodu rada bunara ( $t > t_1$ ) elementarna (a i ukupna) depresija je:

$$S_1 = \frac{Q_1}{4\pi T} \cdot W(u_1), \quad u_1 = \frac{r^2 \mu}{4T(t - t_1)} \quad (16)$$

U periodu posle promene promene proticaja bunara ( $t > t_2$ ), elementarna depresija je:

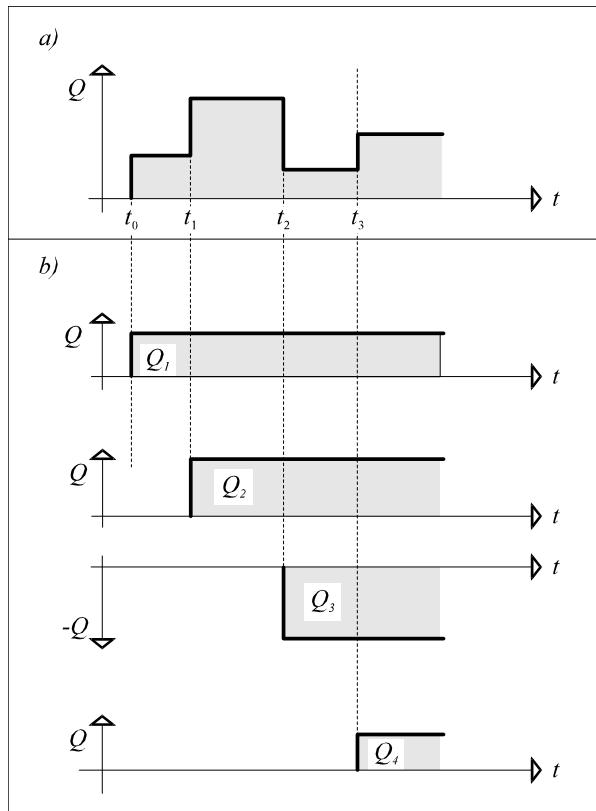
$$S_2 = \frac{Q_2 - Q_1}{4\pi T} \cdot W(u_2), \quad u_2 = \frac{r^2 \mu}{4T(t - t_2)} \quad (17)$$

Ukupna depresija u vremenu  $t > t_2$  se dobija kao zbir elementarnih, koje su rezultat dva elementarna proticaja,  $Q_1$  i  $Q_2 - Q_1$ :

$$S = S_1 + S_2 \quad (18)$$

### Slučaj crpenje bunara sa složenim hidrogramom

Kao što je u prethodnom slučaju dati realni hidrogram predstavljen sumom dva elementarna proticaja, isti princip se može primeniti i u slučaju složenog, proizvoljnog hidrograma. Na slici 44 prikazan je mogući slučaj složenog hidrograma, koji je razložen na elementarne.



Slika 44. a) Složeni hidrogram, b) razložen na elementarne

### SLUČAJ RADA GRUPE BUNARA

Posmatra se rad grupe bunara, koji se nalaze u homogenoj, izotropnoj izdani, neograničenog prostiranja. U opštem slučaju, svi bunari rade sa različitim kapacitetima, koji su, radi lakšeg razmatranja, konstantni. Vreme početka crpanja iz svakog pojedinog bunara ( $t_p$ ) je takođe različito:

$$t_p = t_1, t_2, \dots, t_n \quad (19)$$

U proizvoljnoj tački strujnog polja,  $M$ , pojedinačni uticaji svakog bunara (depresije), koji su rezultat njihovog rada, mogu se predstaviti sistemom jednačina (4-2):

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{Q_1}{4\pi T} W(u_1) & u_1 &= \frac{r_1^2 \mu}{4T(t-t_1)} \\ S_2 &= \frac{Q_2}{4\pi T} W(u_2) & u_2 &= \frac{r_2^2 \mu}{4T(t-t_2)} \\ &\vdots & \vdots & \vdots \end{aligned} \quad (20)$$

$$S_n = \frac{Q_n}{4\pi T} W(u_n) \quad u_n = \frac{r_n^2 \mu}{4T(t-t_n)}$$

dok je ukupna, sumarna depresija u tački  $M$ :

$$S^M = \sum_{i=1}^{i=n} S_i^M \quad (21)$$

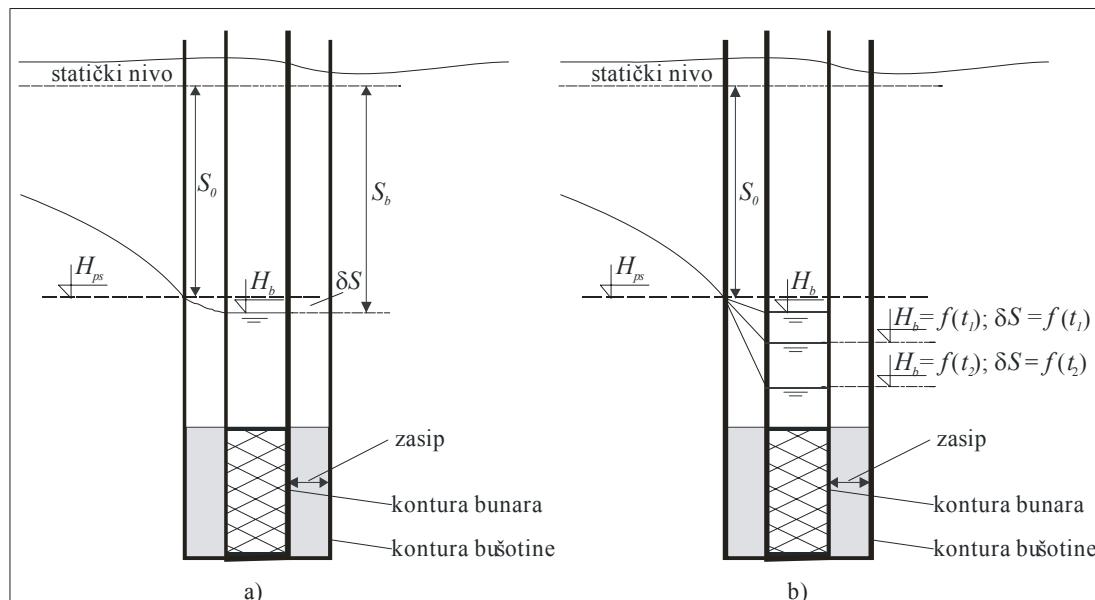
gde je:

$n$  - ukupan broj bunara.

Poštjujući navedene principe moguće je interpretirati i analizirati i složenije slučajeve strujanja, sa više bunara i sa složenijim hidrogramima.

## LOKALNI HIDRAULIČKI OTPORI BUNARA

Kod idealizovanog bunara, nivo vode u unutrašnjosti bunarske cevi je jednak (pijezometarskom, ili slobodnom) nivou u poroznoj sredini na spoljoj konturi bušotine. Međutim, u stvarnosti nije tako. Čak i kod novog bunara, koji je urađen po „svim propisima“ postoji razlika između ova dva nivoa, koja se javlja usled hidrauličkog otpora vode na putu od konture bušotine do unutrašnjosti bunara. Tokom vremena, ovaj hidraulički otpor se brže ili sporije povećava, proces poznat pod imenom „starenje bunara“, [slika 45](#).



Slika 45. Razlika u nivoima vode u bunaru i poroznoj sredini a) kod novog bunara; b) opadanje nivoa u bunaru usled procesa njegovog starenja

Ova pojava se uočava i pri konstantnom i pri promenljivom kapacitetu bunara, a često uz njegovo istovremeno smanjenje. Ona je posledica začpljenja pornog prostora i otvora na filtru bunara, a naziva se kolmiranje bunara. Uzroci kolmiranja su mnogobrojni, pojednostavljeno, oni su mehaničke i biohemičke prirode.

Povećani hidraulički gubici u zoni bunara se često nazivaju i parazitski hidraulički gubici. Prema tome, može se reći da registrovana depresija u bunaru sadrži, pored depresije koja je rezultat filtracije vode kroz poroznu sredinu i depresiju, koja je posledica pojave dopunskih, parazitskih hidrauličkih gubitaka, koji se formiraju u samoj konstrukciji bunara i njegovoj prifiltarskoj zoni:

$$S_b = S_0 + \delta S \quad (22)$$

gde je:

$S_b$  - registrovana (ukupna) depresija u bunaru, [L],

$S_0$  - depresija u bunaru, kao rezultat strujanja u poroznoj sredini (u skladu sa Darsijevim zakonom strujanja), [L],

$\delta S$  - dopunska, parazitska depresija u bunaru, [L].

Za razliku od  $S_0$ , koja je rezultat laminarnog strujanja u poroznoj sredini,  $\delta S$  može da u sebi sadrži parazitske hidrauličke gubitke i laminarnog,  $S_L$ , i kvadratnog,  $S_T$ , karaktera (usled filtracionog toka u laminarnom, odnosno turbulentnom režimu). Tako se može napisati da je:

$$\delta S = S_L + S_T \quad (23)$$

odosno, ukupna depresija u bunaru je:

$$S_b = S_0 + S_L + S_T \quad (24)$$

Uvodeći funkcionalnu zavisnost depresije i proticaja, uz odgovarajuće koeficijente, dobija se izraz za ukupnu depresiju u bunaru, napisan na drugi način:

$$S_b = A_0 Q + A_1 Q + B Q^2 \quad (25)$$

gde je:

$A_0$  - koeficijent gubitka energije, koji je posledica filtracije vode u poroznoj sredini, [ $L^{-2}T$ ]. Izražava se kao:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi T} \ln \frac{R_A}{r_0}; \quad R_A = f(t) \quad (26)$$

$A_1$  - koeficijent gubitka energije, odnosno hidrauličkih gubitaka u laminarnom režimu strujanja, [ $L^{-2}T$ ],

$B$  - koeficijent hidrauličkih gubitaka, u turbulentnom režimu strujanja, [ $T^2 L^{-5}$ ].

Pojedinačne depresije u bunaru, u jednačini (5-3), različitog karaktera, izražavaju se kao:

$$S_0 = A_0 Q \quad (27)$$

$$S_L = A_1 Q \quad (28)$$

$$S_T = B Q^2 \quad (29)$$

Pošto koeficijenti  $A_0$  i  $A_1$  pripadaju istom, tj. laminarnom režimu strujanja, može se napisati da je njihov zbir jednak koeficijentu ukupnih hidrauličkih gubitaka, koji su posledica toka podzemnih voda u laminarnom režimu, ( $A$ ):

$$A = A_0 + A_1 \quad (30)$$

Ovakva šematizacija depresije u bunaru je posledica uprošćavanja brojnih procesa koji je u realnim uslovima uzrokuju definišu.

# DODATAK

## FAJLOVI

Fajlove \*.well i \*.piez je najlakše generisati iz Excel-a, gde je potrebno fajl snimiti kao \*.csv pri čemu se za odvajanje kolona koristi zarez. Potom ga preimenovati tako da ekstenzija bude \*.well odnosno \*.piez. Takođe, moguće ove fajlove je moguće učitati u Excel-u, ali je prilikom učitavanja kada Excel ponudi opcije za učitavanje potrebno staviti da delimiter bude samo zarez.

### Struktura fajlova \*.well

U fajlu \*.well smešteni su podaci za jedan bunar. Struktura ovog fajla je:

linija 1 ---- Well name:

linija 2 ---- Ime bunara

linija 3 ---- Position:

linija 4 ---- x-koordinata bunara, y-koordinata bunara

linija 5 ---- Radius:

linija 6 ---- Poluprečnik bunara

linija 7 ---- Time, Discharge rate:

linije od 8 do  $i$  ---- Vremenski trenutak (u prethodno odabranoj jedinici vremena, naprimjer u sekundama), proticaj (uvek u L/s),  $i \geq 9$ , pri čemu je broj proticaja  $i-8$

linija  $i+1$  ---- Time, Measured drawdown:

linije od  $i+2$  do  $j$  ---- Vremenski trenutak, izmerena depresija (broj izmerenih depresija je  $j-(i+2)$ )

linija  $j+1$  ---- Time, Linear loss parameter:

linije od  $j+2$  do  $k$  ---- Vremenski trenutak, koeficijeni linearnih gubitaka

linija  $k+1$  ---- Time, Quadratic loss parameter:

linije od  $k+2$  do  $m$  ---- Vremenski trenutak, koeficijent kvadratnih gubitaka

Obratiti pažnju kada se \*.well fajl pravi u Excel-u, da zarez u prethodnom objašnjenju označava da je potrebno preći u susednu ćeliju u istoj vrsti. Npr. u liniji 7 jedna ćelija je „Time“ (u koloni A), dok je „Discharge rate“ druga (u koloni B). Primer je dat na [slici 46](#).

**Napomena:** Decimalni zarez u brojevima mora biti zadat tačkom.

A	B	C
1 Well name:		
2 bunar		
3 Position:		
4 1.1	1.2	
5 Radius:		
6 2		
7 Time	Discharge rate:	
8 1	1	
9 2	2	
10 Time	Measured drawdown	
11 1	1	
12 3	3	
13 5	5	
14 Time	Linear loss parameter	
15 1	1	
16 2	2	
17 3	3	
18 Time	Quadratic loss parameter	
19 1	1	
20 2	2	
21		

Slika 46. Primer \*.well fajla u Excel-u

### Struktura fajlova \*.piez

U fajlu \*.piez smešteni su podaci za jedan pijezometar. Struktura ovog fajla je:

linija 1 ----- Piezometer name:

linija 2 ----- Ime pijezometra

linija 3 ----- Position:

linija 4 ----- x-koordinata pijezometra, y-koordinata pijezometra

linija 5 ----- Time, Measured drawdown:

linije od 6 do i ----- Vremenski trenutak, izmerena depresija

Primer \*.piez fajla je dat na slici 47.

A	B	C
1 Piezometer name:		
2 P1		
3 Position:		
4 1.2	2.3	
5 Time	Drawdown	
6 1.2	3	
7 2	4	
8 3	5	
9		

Slika 47. Primer \*.piez fajla u Excel-u

## LITERATURA

1. Pušić M. (1994) *Hidraulika podzemnih voda (stacionarna strujanja)*, Slavija press, Novi Sad, str. 157
2. Pušić M. (1996) *Dinamika podzemnih voda*, Rudarsko geološki fakultet, Balby international, Beograd, str. 341
3. Pušić M. (2011) *Hidraulika podzemnih voda*, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko geološki fakultet, str. 1-320
4. Pušić M. (2012) *Hidraulika bunara*, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko geološki fakultet, str. 1-340
5. Vuković M., Soro A. (1984) *Dinamika podzemnih voda, kroz rešene probleme, ustaljena strujanja*, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd
6. Vuković M., Soro A. (1995) *Hidraulika bunara, teorija i praksa*, Građevinska knjiga, Beograd
- ...

## SADRŽAJ

PROGRAM ZA PRORAČUN STRUJANJA PODZEMNIH VODA PREMA USAMLJENOM, ILI GRUPI BUNARA .....	1
PREDGOVOR .....	2
UVOD .....	3
UVODNE NAPOMENE .....	4
STRUKTURA SOFTVERA .....	4
Meni File .....	5
Meni Settings.....	5
Meni Results.....	6
Meni Help.....	6
Kartica PARAMETERS .....	7
Unošenje podataka u tabele.....	7
Prognozni proračuni - unošenje podataka .....	9
Podešavanje granica .....	9
Grafički prikaz karte.....	11
Kartica INTERACTION TAB .....	13
Kartica PRINT TAB.....	15
Kartica VISUALIZATION .....	16
Računanje elemenata prikaza .....	16
Podešavanja izolinija.....	17
Podešavanje strujnica .....	18
Grafički prikaz izolinija i strujnica.....	22
TEORIJSKE OSNOVE - JEDNAČINA STRUJANJA PODZEMNIH VODA PREMA BUNARU (THEIS, 1935) .....	23
SUPERPOZICIJA STRUJANJA .....	25
Metoda ogledalnih slika (metoda preslikavanja) .....	26
Strujanje prema bunaru sa promenljivim proticajem .....	28
Slučaj uključenja i isključenja bunara .....	28
Slučaj crpenje bunara sa složenim hidrogramom.....	29
Slučaj rada grupe bunara .....	29
LOKALNI HIDRAULIČKI OTPORI BUNARA.....	30
DODATAK .....	32
Fajlovi.....	32
LITERATURA .....	34