

# Simulacija strujnica protjecanja

---

**Pondeljak, Josip**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:912310>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-21**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij naftnog rudarstva

## **SIMULACIJA STRUJNICA PROTJECANJA**

Diplomski rad

Josip Pondeljak

N 305

Zagreb, 2021.

## SIMULACIJA STRUJNICA PROTJECANJA

JOSIP PONDELJAK

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

### Sažetak

U ovom diplomskom radu obrađeni su razvoj i primjene simulacije ležišta putem strujnica protjecanja te je na konkretnom primjeru pokazana njena učinkovitost. Simulacija strujnicama koristi se od kraja 20-og stoljeća, no uz mnoge napretke danas se može koristiti i za simulaciju naprednijih pojava poput stlačivog protoka ili ležišta s dvostrukom poroznosti, kao i u komponentnim sustavima i za simulaciju termalnih procesa. Najčešće primjene simulacije pomoću strujnica uključuju: optimizaciju zavodnjavanja, simulaciju mješivog utiskivanja fluida, usklađivanje historijata, rangiranje i procjena nepouzdanosti geoloških modela, povećanje rezolucije modela i odabir lokacije bušotina. Kao primjer u simulatoru strujnica FrontSim simulirana je proizvodnja iz plinsko-kondenzatnog polja te su pokazani promjena zasićenja plinom i drenažne zone bušotina na temelju kojih se mogu donesti odluke o promjeni režima proizvodnje ili o lokaciji novih bušotina.

Ključne riječi: simulacija strujnica, utiskivanje fluida, zavodnjavanje, historijat, FrontSim

Diplomski rad sadrži: 40 stranica, 22 slike i 53 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Domagoj Vulin, izvanredni profesor RGNf

Pomoć pri izradi: Lucija Jukić, mag. ing. petrol.

Ocjenjivači: dr. sc. Domagoj Vulin, izvanredni profesor,  
dr. sc. Vladislav Brkić, izvanredni profesor,  
dr. sc. Sonja Koščak Kolin, docentica

Datum obrane: 15.01.2021., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

## STREAMLINE SIMULATION

JOSIP PONDELJAK

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Petroleum and Gas Engineering and Energy  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Abstract

This Master's thesis explains the development and applications of reservoir simulation using streamlines and gives an example of its efficiency. Streamline simulation was first used at the end of the 20th century but has seen many improvements and can now be used in simulations of advanced processes, e.g. compressible flow, dual porosity reservoirs, compositional systems and thermal processes. The most common uses for streamline simulation are: waterflood optimization, simulation of miscible fluid injection, history matching, ranking and uncertainty evaluation of geological models, upscaling and choosing well location. The FrontSim streamline simulator was used to simulate a gas-condensate reservoir and the results showed gas saturation changes over time and each well's drainage zone. Based on these results one can make decisions regarding production rates or new well locations.

Keywords: streamline simulation, fluid injection, waterflooding, history matching, FrontSim

Thesis contains: 40 pages, 22 figures and 53 references

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Domagoj Vulin, PhD

Technical support and assistance: Lucija Jukić, MSc

Reviewers: Associate Professor Domagoj Vulin, PhD  
Associate Professor Vladislav Brkić, PhD  
Assistant Professor Sonja Koščak Kolin, PhD

Date of defense: January 15<sup>th</sup> 2021, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

# SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	I
POPIS KORIŠENIH OZNAKA I JEDINICA .....	II
1. UVOD.....	1
2. OSNOVE I PROŠIRENJA SIMULATORA STRUJNICA.....	4
2.1. Transformacija u fizički prostor .....	5
2.2. Očuvanje mase.....	8
2.3. Periodično ažuriranje strujnica .....	9
2.4. Numeričko rješavanje po strujnicama .....	9
2.5. Proširenje na utjecaj gravitacije.....	10
2.6. Proširenje na stlačiv protok .....	11
2.7. Dvostruka poroznost.....	12
2.8. Komponentni simulator strujnica .....	13
2.9. Termalni simulator strujnica .....	14
3. PRIMJENA SIMULACIJE STRUJNICA .....	15
3.1. Mješivo utiskivanje .....	15
3.2. Optimizacija zavodnjavanja .....	16
3.3. Usklađivanje historijata .....	20
3.4. Rangiranje i procjena nepouzdanosti geoloških modela .....	22
3.5. Homogenizacija modela.....	24
3.6. Odabir lokacija bušotina .....	25
4. POSTAVLJANJE MODELA U SIMULATORU STRUJNICA FRONTSIM .....	26
4.1. Datoteke i ključne riječi.....	27
4.1.1. Pregled „DATA“ datoteke.....	30
5. PRIMJER SIMULACIJE PLINSKO-KONDENZATNOG POLJA LAGO STRUJNICAMA.....	31
5.1. Analiza rezultata simulacije .....	32
6. ZAKLJUČAK .....	34
7. LITERATURA.....	36

## POPIS SLIKA

<b>Slika 2-1.</b> Distribucije tlaka kod izravnih (lijevo) i pomaknutih (desno) linija utisnih i proizvodnih bušotina .....	4
<b>Slika 2-2.</b> Strujnice izvedene koristeći rješenja linijskog izvora i načela superpozicije.....	4
<b>Slika 2-3.</b> Prikaz linearne brzine u Pollock-ovoj metodi .....	5
<b>Slika 2-4.</b> Prikaz vremena potrebnog za izlaz čestice iz određenog smjera.....	6
<b>Slika 2-5.</b> Minimalno potrebno vrijeme izlaska čestice iz ćelije .....	6
<b>Slika 2-6.</b> Potpuno iscertana strujnica Pollock-ovom metodom.....	7
<b>Slika 2-7.</b> Transformacija ne-ortogonalne ćelije izoparametarskom transformacijom.....	7
<b>Slika 2-8.</b> Ekvivalentnost iscertavanja strujnice do određenog TOF i popunjavanja volumne strujnice volumenom .....	8
<b>Slika 2-9.</b> Promjene geometrija strujnica s promjenom bušotinskih uvjeta, tj. vremena.....	9
<b>Slika 2-10.</b> Razlika regularizacije rešetke i spajanja najmanjih ćelija .....	10
<b>Slika 2-11.</b> Ne poklapanje faznih vektora s vektorom ukupne brzine zbog utjecaja gravitacije (lijevo); Prikaz koraka rješavanja jednadžbe materijalnog uravnoteženje nakon razdvajanja operatora (desno) .....	10
<b>Slika 2-12.</b> Prikaz strujnica prilikom dva različita vremena primarne proizvodnje .....	11
<b>Slika 2-13.</b> Shema po kojoj se dvostruka poroznost računa u simulaciji strujnica.....	12
<b>Slika 3-1.</b> Usporedba proizvodnje dobivene tradicionalnom simulacijom WAG procesa i simulacijom strujnica.....	15
<b>Slika 3-2.</b> a) Veza utisne i proizvodnih bušotina preko strujnica; b) Karta protoka.....	16
<b>Slika 3-3.</b> Učinkovitosti utiskivanja bušotina na polju na Bliskom Istoku .....	17
<b>Slika 3-4.</b> Postepena promjena dobava utiskivanja u svrhu dobivanja uravnoteženijeg uzorka drenažnih zona.....	18
<b>Slika 3-5.</b> 3D model ujednačenog uzorka bušotina.....	22
<b>Slika 3-6.</b> Usporedba homogeniziranih modela s originalnim preko drenažnih zona prikazanih strujnicama.....	24
<b>Slika 4-1.</b> Shema komunikacije FrontSim-a s pre i post procesorima preko datoteka .....	29
<b>Slika 5-1.</b> Zasićenje ležišta plinom u šest različitih koraka simulacije.....	33
<b>Slika 5-2.</b> Drenažne zone bušotina u šest različitih koraka simulacije .....	33

## POPIS KORIŠENIH OZNAKA I JEDINICA

<u>Oznaka</u>	<u>Značenje</u>	<u>Jedinica</u>
$V_{(x,y,z)}$	brzina u smjeru x, y ili z	[m/s]
$V_{(x0,y0,z0)}$	početna brzina u smjeru x, y ili z	[m/s]
$V_{(xi,yi,zi)}$	početna brzina u smjeru x, y ili z na ulaznoj točki	[m/s]
$g_{(x,y,z)}$	gradijent brzine u smjeru x, y ili z	[m/s]
$\Delta t_{(x,y,z)}$	vrijeme izlaska čestice iz ćelije iz smjera x, y ili z	[m/s]
$x_i, y_i$	koordinate ulazne točke čestice na ćeliji	[-]
$x_e, y_e$	koordinate izlazne točke čestice na ćeliji	[-]
$\Delta t_m$	najkraće vrijeme izlaska čestice iz ćelije	[s]
$I_{eff}$	učinkovitost utiskivanja fluida	[-]

## 1. UVOD

Simulacija strujnica pruža alternativan pristup simulaciji ležišta, u odnosu na uobičajenu diskretizaciju prostora rešetkama ili ćelijama poznatih volumena. Za razliku od standardnih simulacijskih tehnika, strujnice predstavljaju trenutak protoka u ležištu, pokazujući potencijale svojstva od interesa (zasićenje, tlak, tj. brzine protjecanja) i stoga mogu zorno pokazivati prostorne karakteristike dreniranja ili zavodnjavanja ležišta (povezano s radom proizvodnih i utisnih bušotina), tj. odnosa protoka na parovima proizvodnih i utisnih bušotina. Glavna razlika simulacijskih tehnika na osnovi ćelija i simulacije protoka na osnovi strujnica je u prikazu zasićenja fazama i komponentama. Kod simulacije na osnovi ćelija, fronte zasićenja se pomiču iz ćelije u ćeliju, dok se kod simulacije strujnica zasićenja mijenjaju po strujnicama unutar protočnog koordinatnog sustava. Zbog ove razlike, za simulaciju strujnica se ističe kako je iznimno efikasna pri rješavanju velikih, geološki kompleksnih, heterogenih modela.

Neke od primjena simulacije strujnica su:

- Vizualizacija protoka
- Optimizacija zavodnjavanja ležišta
- Efikasno izvođenje studija osjetljivosti na parametrima modela
- Određivanje efikasnosti proizvodnih i utisnih bušotina
- Pomoć pri povijesnom poklapanju i optimalnom smještaju bušotina
- Potvrđivanje skaliranja generiranjem referentnih rješenja preciznih modela
- Rangiranje proizvodnih scenarija i geoloških modela
- Upravljanje i optimizacija utiskivanja i proizvodnje fluida
- Nadgledanje ležišta i EOR projekata.

Prednost simulacije strujnica je i u njenoj jednostavnosti. Glavni cilj je prikazati kako utisnuti fluidi, najčešće voda i/ili plin, istiskuju ležišne fluide ovisno o: položaju bušotina, protoku bušotina, geometriji ležišta i geološkom okolišu.

U začetku, pretpostavka simulacije strujnica bila je da su fluidi i sustav pora nestlačivi. Ovom pretpostavkom odvajaju se tlak i zasićenja te se omogućava prikaz strujnica koje nisu ovisne o strujnicama pored sebe. Stoga je simulacija strujnica odličan alat kod



modeliranja sustava koji nisu funkcija apsolutnog tlaka nego gradijenta tlaka. Također, činjenica da su strujnice neovisne jedna o drugoj čini simulaciju strujnica nepogodnom za modeliranje sustava u funkciji kapilarnog tlaka i kompresibilnosti. Na primjer, u slučaju modeliranja primarne proizvodnje, simulacija strujnica nema prednosti nad konvencionalnom simulacijom zato što je tada potrebno prikazati pad tlaka u vremenu, a ne napredak zasićenja.

Dobar izbor za simulaciju strujnicama je ležište s nekim od režima održavanja tlaka kao npr. zavodnjavanjem. Također, uspješno su izvedene i simulacije predviđanja proizvodnje kao i simulacije modela utiskivanja mješovitog plina. Zamjena ležišne nafte s plinom pri visokom tlaku odgovara simulaciji strujnicama jer se rješava simulacijom lokalnog zahvata što se, za razliku od drugih formulacija, može modelirati bez numeričkih problema. Korištenjem formulacije za dvostruku poroznost vrlo se efektivna pokazala i simulacija frakturiranih ležišta.

Prednost simulacije strujnica u odnosu na tradicionalan pristup je u i njenoj efikasnosti što se tiče korištenja memorije i brzine proračuna. Efikasna je u korištenju memorije jer se samo tlak rješava implicitno dok se povlačenje strujnica i rješavanje određenog transportnog problema na njihovim putanjama izvodi sekvencijalno. U bilo kojem vremenu samo jedna strujnica je u memoriji. Proračun je također brži jer se transportni problemi rješavaju po svakoj strujnici te nisu otežani trodimenzionalnim numeričkim sustavom, tj. transport po strujnicama je jednodimenzionalan što znači da se rješava vrlo efikasno.

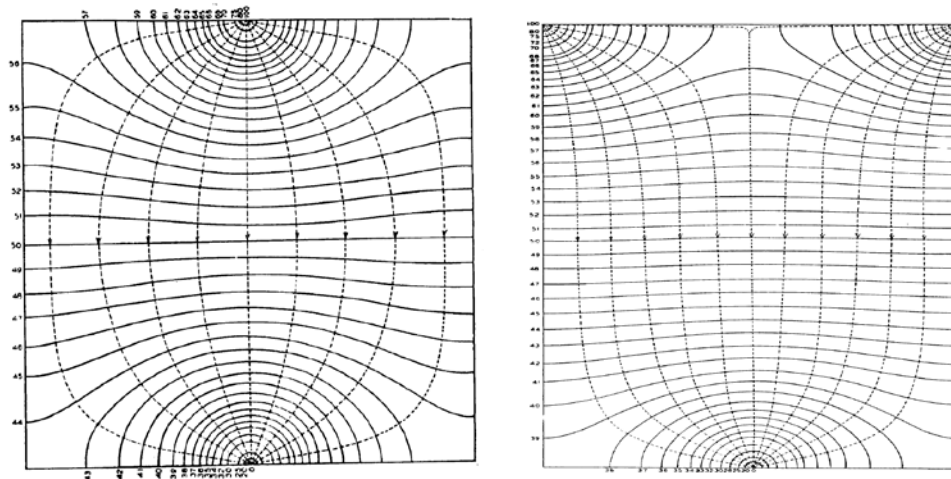
Simulacija strujnica prema (Thiele, 2005) zasniva se na šest principa:

1. iscertavanje trodimenzionalnih strujnica u pogledu proteklog vremena (*engl. time-of-flight, TOF*)
2. revizija jednadžbi očuvanja mase po strujnicama u pogledu proteklog vremena
3. periodičko ažuriranje strujnica
4. numerička rješenja jednodimenzionalnog transporta po strujnicama
5. rješavanje gravitacijskih efekata koristeći podjelu operatora
6. proširenje na stlačiv protok

Strujnicama se dobivaju novi podaci koji su nedostupni konvencionalnim simuliranjem. Pošto strujnice imaju početak i kraj moguće je odrediti u kojoj mjeri svaka utisna bušotina utječe na svaku proizvodnu, što posebno postaje interesantno prilikom detektiranja problema u trodimenzionalnom numeričkom modelu, preciznije, kada je korisno uočiti puteve migracije fluida po ležištu. Npr., u slučaju kada je na proizvodnoj bušotini visok udio vode, može se detektirati da li su tome glavni uzrok utisne bušotine ili granice s akviferom. Strujnicama se također identificira volumen ležišta povezan s nekom od bušotina u sustavu zato što dio ležišta kojim prolazi strujnica povezana s određenom bušotinom pripada drenažnom volumenu te bušotine. Tada je moguće podijeliti ležište na dinamički definirane drenažne zone bušotina. Svojstva vezana uz volumen ležišta se zatim mogu izraziti na osnovi bušotina, npr. početne rezerve nafte, početne rezerve vode i prosječni tlak.

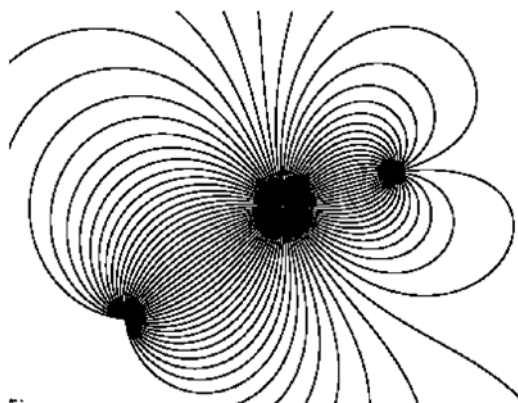
## 2. OSNOVE I PROŠIRENJA SIMULATORA STRUJNICA

Strujnice se prvi put spominju u smislu modeliranja protoka fluida u radu Muskata i Wyckoffa (1934.) u kontekstu analize mreža bušotina sa svrhom zavodnjavanja. Korištene su za prikaz distribucije tlaka kod izravnih i pomaknutih linija utisnih i proizvodnih bušotina (Slika 2-1., strujnice su okomite na izolinije tlaka).



**Slika 2-1.** Distribucije tlaka kod izravnih (lijevo) i pomaknutih (desno) linija utisnih i proizvodnih bušotina (Muskat i Wyckoff, 1934)

Klasičan pristup modeliranju strujnica je korištenje rješenja linijskog izvora i načela superpozicije radi izvođenja vektora s pretpostavkom nestlačivosti, omjera mobilnosti te homogenog i izotropnog ležišta. (Caudle, 1966). Na slici 2-2. vidi se primjer strujnica neograničenog ležišta dobivenih navedenom metodom.



**Slika 2-2.** Strujnice izvedene koristeći rješenja linijskog izvora i načela superpozicije (Caudle, 1966)

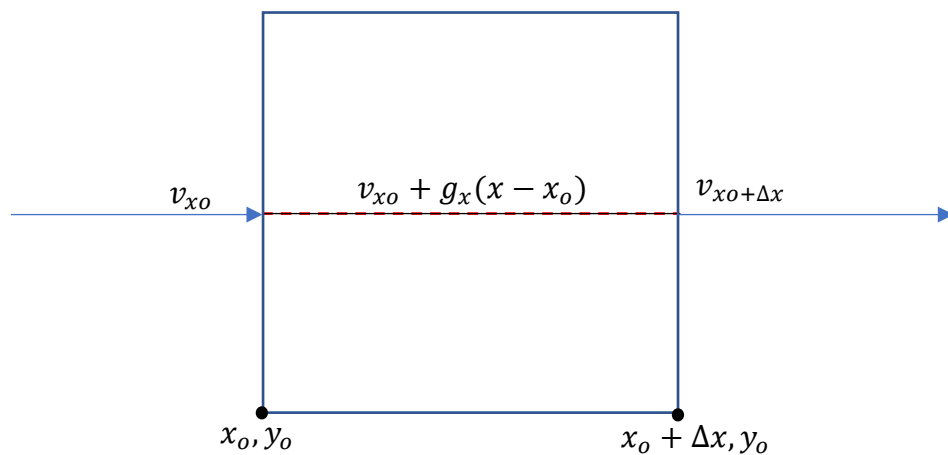
## 2.1. Transformacija u fizički prostor

Prvi princip na kojem se zasniva moderna simulacija strujnica je iscrtavanje strujnica u tri dimenzije koristeći varijablu proteklog vremena (*engl. time-of-flight, TOF*), što omogućava računanje protoka između slojeva i oko geoloških prepreka kao i gravitaciju. Navedenu metodu razvio je Pollock (1988) te se ona zasniva prvo na računanju ukupnog protoka u i iz svake granice neke ćelije pomoću Darcy-evog zakona. Kada je ukupan protok poznat računaju se izlazna točka i vrijeme do izlaska za bilo koju ulaznu točku.

Brzina u x smjeru ( $v_x$ ) ilustrirana je na slici 2-3 i zadana je navedenom jednačinom:

$$v_x = v_{x0} + g_x(x - x_0) \quad (2-1)$$

gdje su  $v_{x0}$  brzina u x smjeru za  $x=x_0$ , a  $g_x$  gradijent brzine u x smjeru, te isto vrijedi u y i z smjeru.

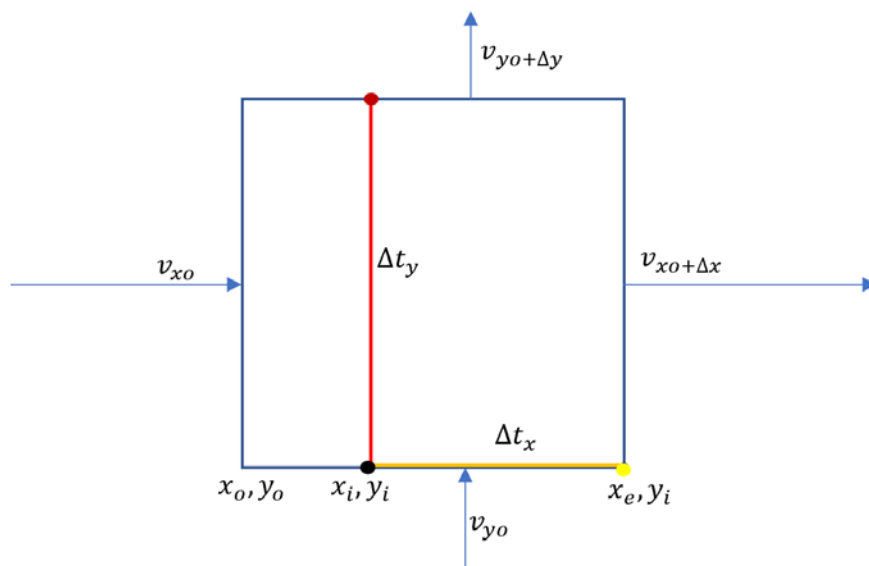


**Slika 2-3.** Prikaz linearne brzine u Pollock-ovoj metodi

Zatim se  $v_x = dx/dt$  (analogno za y i z smjerove) može integrirati kako bi se dobilo vrijeme izlaska iz svake strane ćelije (Slika 2-4.):

$$\Delta t_x = \frac{1}{g_x} \ln \left[ \frac{v_{x0} + g_x(x_e - x_0)}{v_{x0} + g_x(x_i - x_0)} \right] \quad (2-2)$$

gdje su  $\Delta t_x$  vrijeme potrebno za prolaz čestice kroz promatrani element prostora u x smjeru, a  $x_e$  koordinata točke izlaza.



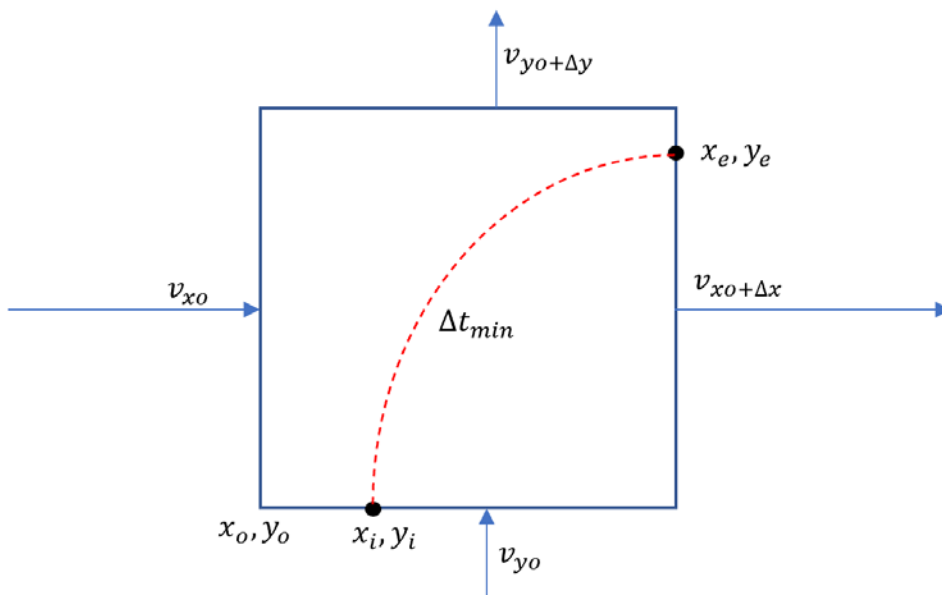
**Slika 2-4.** Prikaz vremena potrebnog za izlaz čestice iz određenog smjera

Pošto će strujnica izaći iz ćelije u najkraćem mogućem vremenu, koordinate izlazne točke (Slika 2-5) mogu se izračunati koristeći to najkraće vrijeme u slijedećim jednadžbama:

$$\Delta t_m = \text{MIN}(\Delta t_x, \Delta t_y, \Delta t_z) \quad (2-3)$$

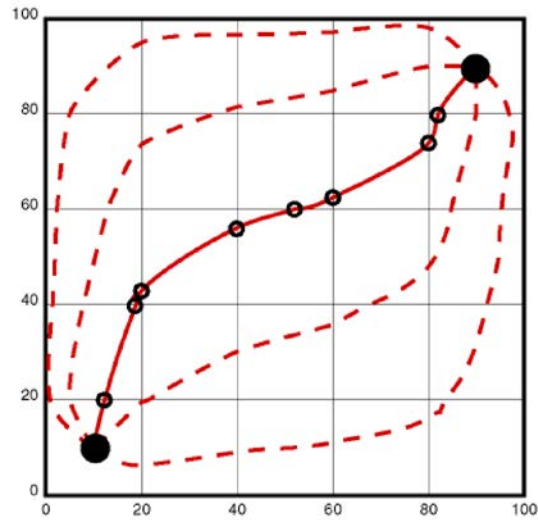
$$x_e = \frac{1}{g_x} [v_{xi} \exp(g_x \Delta t_m) - v_{x0}] + x_0 \quad (2-4)$$

gdje  $\Delta t_m$  označava najkraće vrijeme.



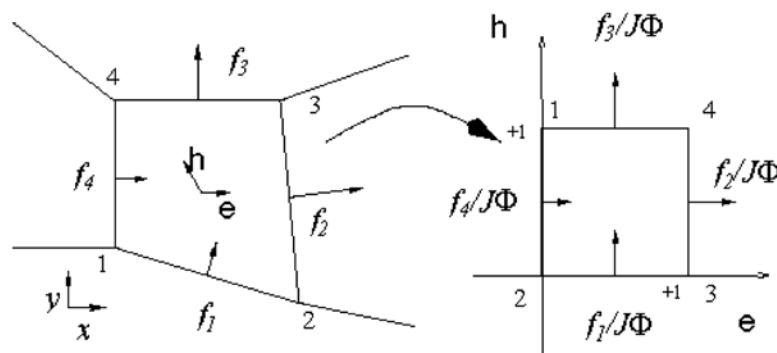
**Slika 2-5.** Minimalno potrebno vrijeme izlaska čestice iz ćelije

Kada su poznate koordinate izlazne točke  $(x_e, y_e, z_e)$  ona postaje početna točka sljedeće ćelije te se isti postupak ponavlja dok se ne iscrta cijela putanja strujnice (Slika 2-6).



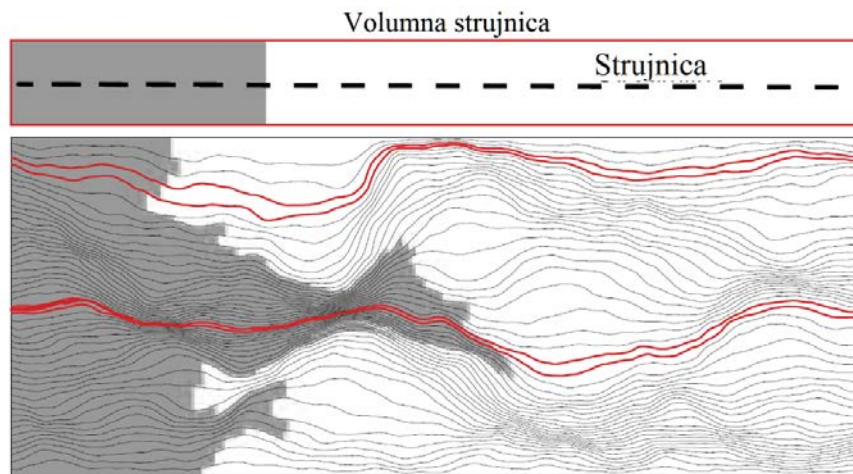
**Slika 2-6.** Potpuno iscrtana strujnica Pollock-ovom metodom (Pollock, 1988)

Problem Pollock-ove metode je što pretpostavlja ortogonalni koordinatni sustav i linearne i nezavisne brzine, a stvarni ležišni modeli rijetko mogu biti opisivi prema takvoj definiciji prostora. Koristeći izoparametarsku transformaciju moguće je transformirati diskretizaciju numeričkog prostora definiranom kutovima ćelija (engl. *corner-point geometry grid*, CPG) u pravokutni koordinatni sustav, primijeniti Pollock-ovu metodu te zatim transformirati izlazne koordinate natrag u fizički prostor (Slika 2-7.). Pomoću ove modifikacije strujnice se mogu iscrtati kroz bilo koje realne rešetke, uključujući i nestrukturirane koje se koriste u ležišnom inženjerstvu (Prévost et al., 2002).



**Slika 2-7.** Transformacija ne-ortogonalne ćelije izoparametarskom transformacijom (Prévost et al., 2002)

Najjednostavnije i najefikasnije iscrtavanje strujnica u tri dimenzije postiže se uz pretpostavku da je svaka strujnica središte (os) volumne strujnice (*engl. streamtube*) poznatog volumena koji je umnožak ukupnog protoka i vremena potrebnog za prolaz kroz ćeliju (*engl. time of flight, TOF*), ali nepoznatih granica (Slika 2-8.). U ovom pristupu strujnice s kratkim TOF-om odgovaraju volumnim strujnicama s velikim volumenom te se odnose na regije brzog protoka, ekvivalentna analogija vrijedi i za strujnice s dugačkim TOF-om. Zbog ovakvog pristupa strujnice se mogu uspješno koristiti u simulaciji kompleksnih 3D problema (Thiele et al., 1996).



**Slika 2-8.** Ekvivalentnost iscrtavanja strujnice do određenog TOF i popunjavanja volumne strujnice volumenom (Thiele et al., 1996)

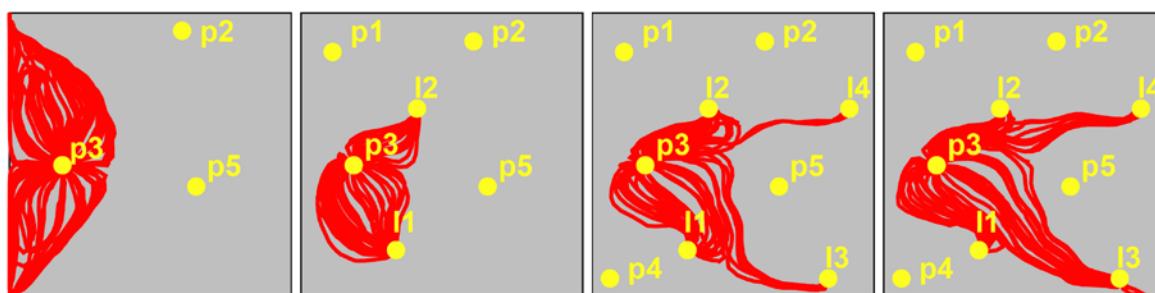
## 2.2. Očuvanje mase

Pri reformulaciji jednadžbi očuvanja mase u smislu TOF-a King *et al.* (1993) prvi su pokazali prednosti korištenja TOF varijable sa strujnicama u odnosu na korištenje volumena sa volumnim strujnicama. Nizom derivacija dokazano je kako se 3D problem može prikazati kao suma 1D problema po strujnicama te je upravo zbog ove činjenice simulacija strujnicama postala tako atraktivna. Kako bi ta derivacija vrijedila, moraju se poštovati tri pretpostavke:

- volumni protok po svakoj strujnici mora biti konstantan
- strujnice se ne mijenjaju s vremenom (ustaljeni protok)
- 1D rješenja moraju imati iste granice i početne uvjete kao i 3D problem.

### 2.3. Periodično ažuriranje strujnica

Pretpostavka ustaljenog protoka predstavljala je prepreku u daljnjem razvoju metoda simulacije strujnica sve do radova Thiele et al. (1996) i Batycky et al. (1997) koji su primarno pokušavali uračunati promjenjiva polja mobilnosti pri mješivom utiskivanju plina. Problemu su pristupili kao nizu ustaljenih protoka tako da su svako polje strujnica smatrali valjanim samo za neki interval vremena prije ažuriranja. Na ovaj način mogle su se uzeti u obzir i promjene ležišnih uvjeta, npr. promjene protoka, dodavanje novih ili zatvaranje starih bušotina i utjecaj gravitacije (Slika 2-9.). Jedini nedostatak bilo je analitičko rješavanje koje je zahtijevalo ujednačene početne uvjete po strujnicama te su se tek nakon uvođenja numeričkog rješavanja mogle računavati promjene bušotinskih uvjeta i gravitacije. S mogućnosti preuzimanja početnih uvjeta od prethodnog koraka geometrija strujnica se mogla mijenjati proizvoljno s jamstvom da će fluidi biti transportirani u pravom smjeru.



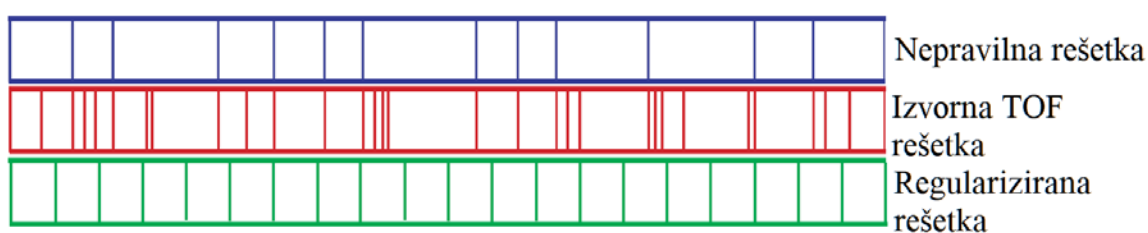
**Slika 2-9.** Promjene geometrija strujnica s promjenom bušotinskih uvjeta, tj. vremena (Thiele, 2005)

### 2.4. Numeričko rješavanje po strujnicama

Prva primjena jednodimenzionalnih numeričkih rješenja po strujnicama pojavila se u radu Bommera i Schectera (1979) u kojemu su pokušali riješiti problem s ispiranjem urana. Iako su koristili numeričko rješavanje, ono je još uvijek bilo primijenjeno na ustaljeni protok te su tek Batycky et al. (1997) spojili promjenjive trodimenzionalne strujnice i jednodimenzionalno numeričko rješenje u pogledu TOF-a. Spajanje ovih dviju ideja dozvolilo je preuzimanje uvjeta od prethodnog koraka i numeričko pomicanje u vremenu, a s time i promjenu strujnica ovisno o razlikama u mobilnosti fluida i promjenama bušotinskih uvjeta. Numeričko 1D rješavanje također je omogućilo primjenu strujnica kod kompleksnijih problema poput korištenja komponentnih modela (engl. *compositional*,



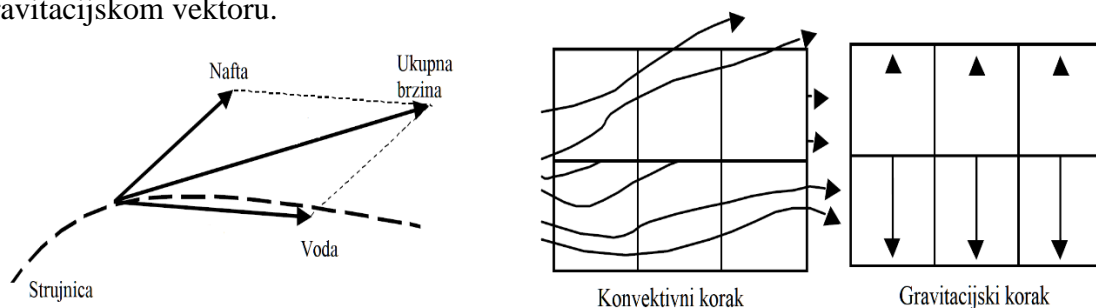
COMP) i modela dvostruke poroznosti (engl. *dual porosity*, DP). Pošto se strujnice sada smatraju odvojenim tj. diskretnim sustavima, zbog diskretizacije TOF-a, dolazi do problema vrlo nepravilne 1D rešetke s ogromnim razlikama između najmanjih i najvećih ćelija, koji dovodi do značajnog pada računalne učinkovitosti. Navedeni problem moguće je riješiti na dva načina (Slika 2-10.). Prvi, korišten u radu Batycky et al. (1997), je regularizacija ćelija svake strujnice, a drugi (Thiele et al., 2004) zadržava nepravilnu rešetku ali spaja najmanje ćelije sa susjednima. Spajanje najmanjih ćelija se pokazalo kao bolje rješenje jer izbjegava nepotrebno miješanje svih ćelija uzrokovano regularizacijom te uklanja najmanje ćelije koje mogu uzrokovati prenik limit propusnosti sustava.



**Slika 2-10.** Razlika regularizacije rešetke i spajanja najmanjih ćelija (Thiele, 2005)

## 2.5. Proširenje na utjecaj gravitacije

Utjecaj gravitacije prvi puta su uzeli u obzir Bratvedt et al. (1996). Gravitacija je predstavljala problem pošto je vektor ukupne brzine, kojemu je strujnica tangenta, suma faznih vektora, a u prisustvu gravitacije fazni vektori nisu usklađeni. Navedeni problem riješen je razdvajanjem operatora u jednažbi materijalnog uravnoteženja u dva koraka, gdje rješenje prvog postaje početni uvjet drugog (Slika 2-11.). Prvi, konvektivni, se rješava po strujnicama, a drugi, gravitacijski, se rješava po gravitacijskim linijama paralelnim gravitacijskom vektoru.



**Slika 2-11.** Ne poklapanje faznih vektora s vektorom ukupne brzine zbog utjecaja gravitacije (lijevo); Prikaz koraka rješavanja jednažbe materijalnog uravnoteženje nakon razdvajanja operatora (desno) (Thiele, 2005)

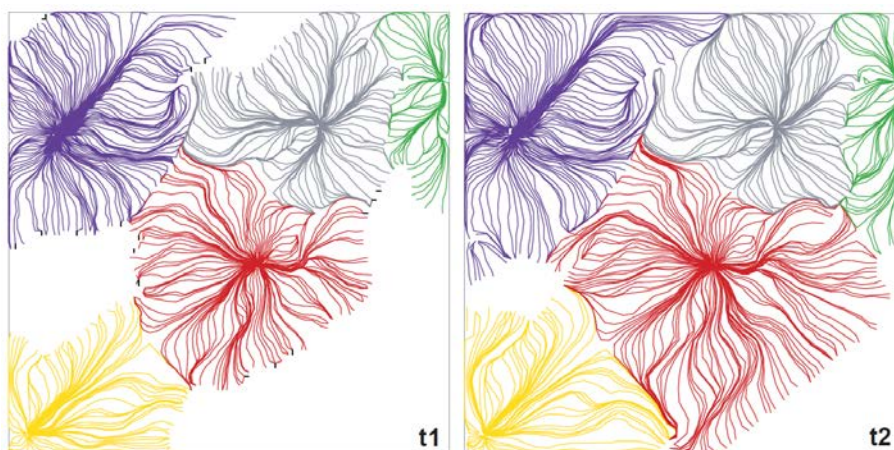
## 2.6. Proširenje na stlačiv protok

Dugo vrijeme simulacija strujnica bila je ograničena pretpostavkom nestlačivog protoka koja je sa sobom nosila pojednostavljena proračuna:

1. početak i kraj strujnica odgovaraju bušotinama tj. svaka strujnica počinje na utisnoj bušotini, a završava na proizvodnoj i
2. protok po svakoj strujnici je konstantan.

Problem je u činjenici što pravi nestlačivi sustavi ne postoje. PVT svojstva su često funkcija tlaka u naftnim kao i u plinsko-kondenzatnim sustavima, a i koeficijent punjenja (*engl. voidage replacement ratio*) može znatno odstupati od norme, lokalno ili na cijelom polju, što dovodi do značajnih promjena tlaka.

Ako je protok stlačiv, onda strujnice mogu početi ili završiti u bilo kojoj ćeliji, čak i u onima bez bušotina. U slučaju elastičnog režima proizvodnje, svaka ćelija u kojoj dođe do povećanja volumena s padom tlaka je potencijalna početna točka strujnice. Slika 2-12, prikazuje takav slučaj, gdje se svaka ćelija kojom strujnica prolazi smatra izvorom zbog ekspanzije fluida.



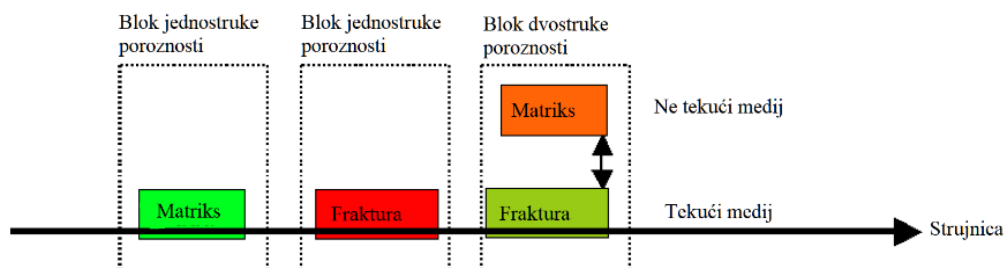
**Slika 2-12.** Prikaz strujnica prilikom dva različita vremena primarne proizvodnje (Thiele, 2005)

Isctavanje strujnica ne predstavlja problem pošto je Pollock-ova metoda primjenjiva neovisno o načinu određivanja brzina sve dok se zadrži linearna nezavisnost u svakom smjeru. Također, TOF odražava efekte stlačivosti ako se polje brzina primarno dobije iz jednadžbe stlačivosti.

Kako bi se uračunalo povezivanje zasićenja tj. sastava fluida i tlaka u stlačivim sustavima potrebno je značajno proširenje matematičke formulacije, a dodatnu komplikaciju stvara i činjenica da protok po strujnicama više nije konstantan. Ingebrigtsen et al. (1999) su razvili dva različita rješenja. Prvo rješenje je sekvencijalna IMPES (*engl. implicit pressure explicit saturation*) metoda s dodatnim koracima radi smanjenja greške nedosljednosti mase. Druga metoda je implicitno istovremeno rješavanje tlaka i zasićenja po strujnicama. Pokazalo se da su rezultati obje metode usporedivi s rezultatima tradicionalnih simulatora. Cheng et al. (2006 a) su generalizirali stlačiv protok u simulaciji strujnica uvođenjem pojma efektivne gustoće po strujnicama. Iskoristili su tu varijablu gustoće u jednadžbi zasićenja i inkorporirali poprečne efekte po strujnicama ažuriranjem tlaka i prepravljanjem zasićenja. Ovaj pristup testiran je na heterogenom karbonatnom ležištu u zapadnom Texasu starom 30 godina te je donio značajan napredak u predviđanju performansi.

## 2.7. Dvostruka poroznost

Proširenje simulacije strujnica na dvostruku poroznost prvi si napravili Di Donato et al. (2003) uvođenjem tekućeg i ne tekućeg medija. Strujnice uvijek prolaze tekućim medijem dok su sa ne tekućim medijem povezane funkcijom prijenosa. Blok tj. ćelija jednostruke poroznosti može predstavljati matriks ili frakturu te se oboje smatraju tekućim medijem. U bloku dvostruke poroznosti fraktura je dio tekućeg medija kojim prolazi strujnica, a matriks u ne-tekućem mediju je povezan s frakturom putem funkcije prijenosa. Slika 2-13. prikazuje navedeni princip. Pri simulaciji zavodnjavanja frakturiranog ležišta rezultati i trajanje simulacije bili su usporedivi s tradicionalnom simulacijom ali kod modela sa više stotina ili milijuna ćelija simulacija strujnica bila je nekoliko redova veličina brža.



**Slika 2-13.** Shema po kojoj se dvostruka poroznost računa u simulaciji strujnica (Thiele, 2005)

Thiele et al. (2004) su proširili rad Di Donato et al. (2003) na kompleksne geološke modele s višestrukim područjima relativne propusnosti, a Kozlova et al. (2006) su napravili proširenje na stlačiv protok. U oba rada dobiveni rezultati bili su slični onima dobivenim tradicionalnim simulatorima ali je simulacija trajala mnogostruko kraće.

## **2.8. Komponentni simulator strujnica**

Prvi komponentni simulator strujnica bio je dvofazan te su ga razvili Thiele et al. (1997). Koristili su 1D tradicionalni komponentni simulator kako bi numerički pratili *pomicanje* komponenti po strujnicama čija su rješenja zatim vratili na osnovni koordinatni sustav i dobili 3D kompoziciju. Crane et al. (2007) su razvili trofazni komponentni simulator koji koristi 1D implicitna rješenja tradicionalne simulacije za rješenja tlaka i kompozicije fluida istovremeno po strujnicama. Za razliku od prethodnih komponentnih simulatora koji su bili numerički, Jessen et al. (2002) su razvili analitički komponentni simulator s kojim su se mogla dobiti 1D rješenja s proizvoljnim brojem komponenta u ležišnom ili utiskivanom fluidu. Ovim simulatorom procijenili su efektivnost zamjene fluida pri mješivom utiskivanju plina te su dobiveni rezultati u usporedbi s tradicionalnim i numeričkim komponentnim simulatorima bili precizniji, dobiveni su brže i nisu bili opterećeni numeričkom disperzijom. Navedeno analitičko rješenje vrijedi samo za konstantne početne uvjete i uvjete utiskivanja. Za slučaje u kojima se komponente kreću u smjerovima koji se ne poklapaju sa strujnicama, poput izmjeničnog utiskivanja vode i plina (engl. Water Alternating Gas, WAG) ovaj pristup ne daje točne rezultate. Yan et al. (2004) razvili su 3D trofazni komponentni simulator posebno prilagođen za izmjenično utiskivanje vode i plina, čiji su se rezultati slagali s tradicionalnim simulatorima, ali je razlika u brzini simulacija bila veća što je simulacijski model bio veći. Proširenje komponentnih simulatora na stlačiv protok napravili su Cheng et al. (2006 b) na način kao i kod numeričkog simulatora s ćelijama poznatih volumena, uvođenjem efektivne gustoće po strujnicama, korištenjem gustoće u jednadžbi zasićenja, inkorporacijom poprečnih efekata po strujnicama ažuriranjem tlaka i prepravljanjem zasićenja. Jedna od prednosti simulacije strujnica je što omogućava veće vremenske korake pri simuliranju, no ako se gravitacija ne zanemaruje tj. primjenjuje se metoda razdvajanja operatora, broj koraka se povećava i simulacija se usporava. Utjecaj ovog pristupa naročito je istaknut u komponentnim simulatorima koji zahtijevaju dodatne proračune. Tanaka et al. (2014) prvi su razvili 3D trofazni komponentni simulator koji uključuje utjecaj gravitacije i kapilarnih efekata bez značajnog utjecaja na brzinu simulacije. Metodom ortogonalne

projekcije preformulirali su jednadžbe transporta po strujnicama tako da su kapilarni i gravitacijski efekti razdvojeni u komponente paralelne i ortogonalne vektoru ukupne brzine koji definira trajektoriju strujnice. Autori su primijenili ovu metodu za precizno proučavanje migracije CO<sub>2</sub> tijekom WAG utiskivanja te su predložili i potencijalnu primjenu prilikom sekvestracije ugljika.

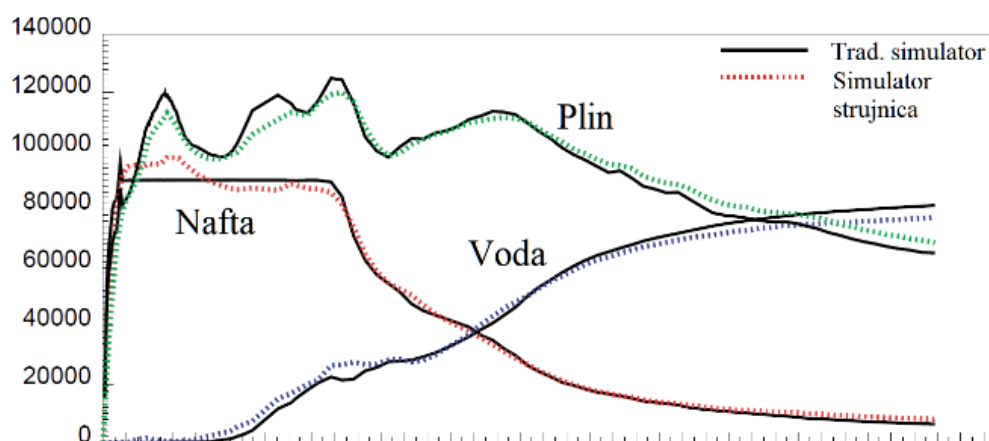
## **2.9. Termalni simulator strujnica**

Pasarai et al. (2005) su s ciljem minimalizacije utjecaja efekta orijentacije ćelija (koji se javlja zbog nepogodnog omjera mobilnosti kod utiskivanja vruće vode) razvili termalni simulator strujnica koji je uračunavao efekte stlačivosti i ne-izotermalnog protoka, ali ne i efekte difuzije, gravitacije, kapilarnosti i kondukcije. Rješavanju jednadžbi transporta mase i topline pristupili su na dva načina, od kojih se prvi pokazao bržim ali manje preciznim dok je drugi bio precizniji ali manje učinkovit. Zhu et al. (2009) proširili su termalni simulator kako bi uključivao termalne efekte viskoznosti ovisne o temperaturi i termalne stlačivosti za dvofazno vruće zavodnjavanje. Zhu et al. (2011) nadovezali su se na svoj prethodni rad i simulirali utiskivanje vruće pare. Koristeći ažuriranje tlaka po strujnicama i novu metodu razdvajanja operatora uspjeli su uračunati velike promjene volumena, snažan utjecaj gravitacije i jaku vezu energije i mase pri transportu. Ovaj termalni simulator testiran je na nekoliko 2D primjera te se što se tiče preciznosti pokazao usporediv s tradicionalnim termalnim simulatorom, a bio je i manje računalno intenzivan.

### 3. PRIMJENA SIMULACIJE STRUJNICA

#### 3.1. Mješivo utiskivanje

Simulacija mješivog utiskivanja, kao i komponentna simulacija, se teže rješava tradicionalnim simulatorima zato što velike razlike u mobilnosti fluida te velike razlike poroznosti i propusnosti dovode do značajnih restrikcija broja koraka simulacije. Pri simulaciji strujnica nema tog problema, te se također lokalna učinkovitost obuhvata modelira precizno po svakoj strujnici, a učinkovitost volumetrijskog obuhvata je dana samom geometrijom strujnica. U projektima mješivog utiskivanja plina često dolazi do preranih proboja plina zbog heterogenosti ležišta i visoke mobilnosti utiskivanog plina. Iako se u simulaciji strujnica često zanemaruju stlačivost fluida, kapilarni tlak i ekspanzija fluida, kvalitetna početna procjena reakcija ležišta na utisnuti plin je korisna pri donošenju daljnjih odluka o vođenju ležišta. Jedan od ranijih primjera korištenja simulacije strujnica u navedenu svrhu je rad Thiele et al. (2002) u kojemu su koristili pojednostavljen PVT model za procjenu učinkovitosti zamjene fluida u 8-komponentnom WAG sustavu na ležištu u Aljasci. Rezultati su zatim uspoređeni s tradicionalnim komponentnim simulatorom i pokazalo se kako simulacija strujnica može modelirati kompleksne procese jednako precizno i to s manjim računalnim zahtjevima (Slika 3-1.).



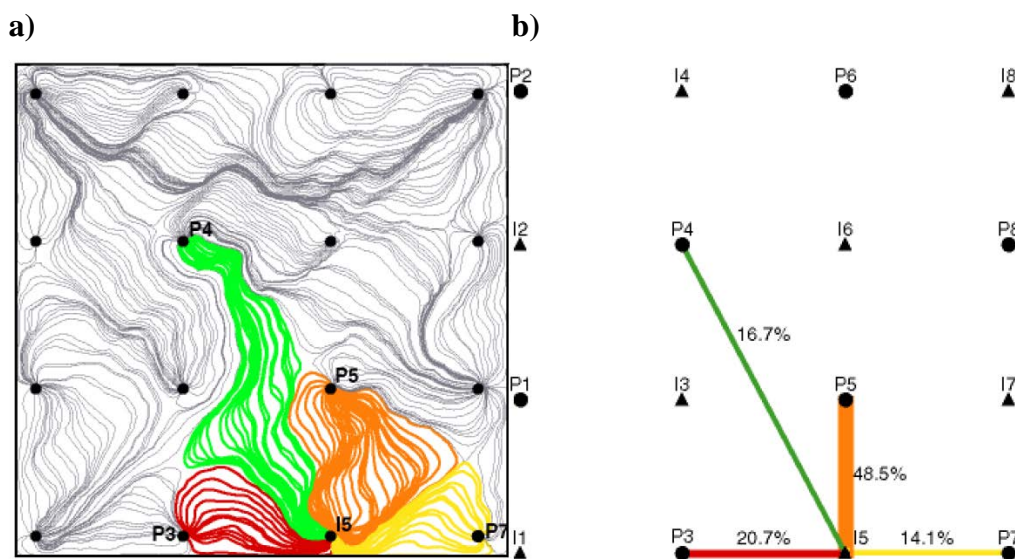
**Slika 3-1.** Usporedba proizvodnje dobivene tradicionalnom simulacijom WAG procesa i simulacijom strujnica (Thiele et al., 2002)

### 3.2. Optimizacija zavodnjavanja

Polazna točka za primjenu strujnica u optimizaciji zavodnjavanja je koncept učinkovitosti utiskivanja koji se prema Thiele et al. (2003) definira na slijedeći način:

$$I_{eff} = \frac{\text{dodatna (off-set) proizvodnja nafte [m}^3/\text{dan]}}{\text{dobava utiskivane vode [m}^3/\text{dan]}} \quad (3-1)$$

U navedenoj jednadžbi dobava utiskivane vode je poznata ali se proizvodnja nafte mora izračunati iz faktora raspodjele bušotina (*engl. well allocation factor, WAF*) koji se prethodno izračunavaju iz strujnica. Također je moguće izračunati učinkovitost utiskivanja za svaki par proizvodnih i utisnih bušotina, u kojem slučaju se i dobava vode i proizvodnja nafte izračunavaju iz strujnica. U jednadžbi 3-1 učinkovitost utiskivanja je omjer dobava čime se dobiva trenutna učinkovitost, no ako se umjesto dobava uvrste kumulativni volumeni tada je rezultat prosječna učinkovitost utiskivanja. Iako u ovom obliku navedena jednadžba 3-1 vrijedi za proces utiskivanja vode i proizvodnje nafte, lako se može primijeniti i na druge vrste fluida uvrštavanjem prikladnih vrijednosti.



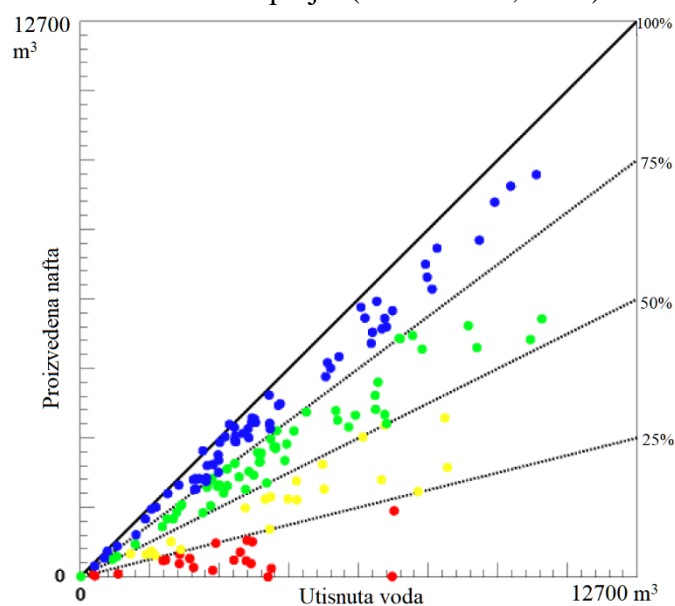
**Slika 3-2.** a) Veza utisne i proizvodnih bušotina preko strujnica; b) Karta protoka (Thiele et al., 2003)

Na slici 3-2. može se vidjeti primjer jednostavnog  $100 \times 100 \times 1$  heterogenog modela sa bušotinama postavljenim u klasičnu mrežu 5 bušotina i očito neuravnoteženim protokom. Ako se želi odrediti učinkovitost utiskivanja na bušotini I5, razmatraju se strujnice koje kreću od te bušotine. Iz strujnica se vidi kako je I5 povezana sa četiri proizvodne bušotine:



P3, P4, P5 i P7, a količina utiskivane vode I5 je također poznata. Dodatna (*off-set*) proizvodnja nafte navedenih proizvodnih bušotina zbog utjecaja I5 je zbroj proizvedene nafte koja dolazi iz strujnica povezanih s I5, a to su na Slici 2-15a. crvene, zelene, narančaste i žute strujnice. Proizvodnja svake grupe strujnica kvantificira se kao faktor raspodjele bušotina (*engl. well allocation factor, WAF*). Slika 2-15b. prikazuje kartu protoka (*engl. flux pattern map*) na kojoj se vide veze između bušotina i jačine tih veza preko debljina poveznih linija. U ovom slučaju, 48,5% volumena utisnute vode usmjereno je prema proizvodnoj bušotini P5, a samo 14,1% prema P7, dok bušotina P4 koja je izvan uzorka prima 16,7% volumena utisnute vode.

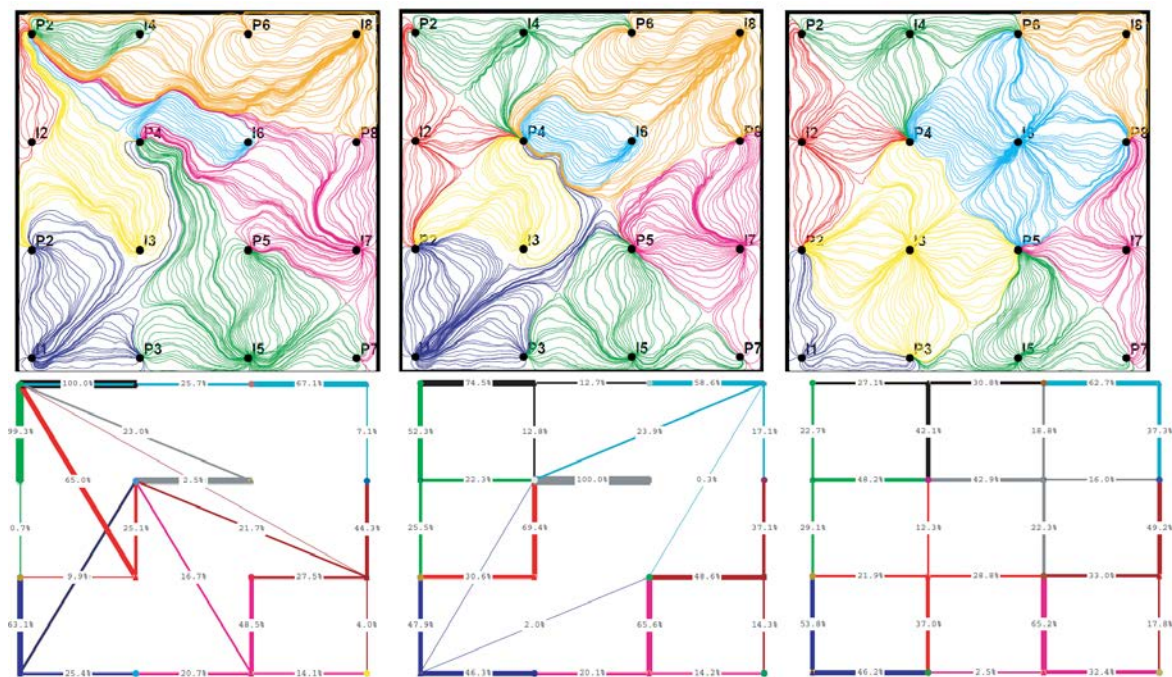
Podaci o učinkovitosti utiskivanja mogu se koristiti na dva načina: održavajući proizvodnju nafte, ili korištenjem manje vode ili povećanjem proizvodnje nafte efikasnijim iskorištavanjem dostupne vode. U oba slučaja prvo je potrebno odrediti učinkovitosti utiskivanja za svaku bušotinu i zatim prosječnu učinkovitost utiskivanja za cijelo polje. Najbolji prikaz učinkovitosti bušotina je preko raspršenog grafa. Na slici 3-3. prikazan je graf učinkovitosti utiskivanja bušotina na polju na Bliskom Istoku s bušotinama obojanim ovisno o učinkovitosti: do 25% crveno, 25% do 50% žuto, 50% do 75% zeleno i 75% do 100% plavo. Kada se znaju individualne i prosječna učinkovitost potrebno je preraspodijeliti utisne volumene vode tako da se utiskivanje smanji na nisko učinkovitim bušotinama, a poveća na visoko učinkovitim bušotinama. Visina učinkovitosti pojedinih bušotina gleda se u usporedbi s prosječnom učinkovitošću polja. (Thiele et al., 2003)



**Slika 3-3.** Učinkovitosti utiskivanja bušotina na polju na Bliskom Istoku (Thiele et al., 2003)



Još jedna korisna primjena strujnica usko vezana uz optimizaciju zavodnjavanja je uravnoteženje uzoraka (*engl. pattern balancing*). Koristeći faktore raspodjele bušotina (WAF) zna se i koliko utisnog volumena utječe na koju proizvodnu bušotinu, pa se dobiva uzorak raspodjele fluida između utisnih i proizvodnih bušotina. Na ovaj način strujnice mogu ukazati na problem gubitka fluida izvan željenog uzorka, što je nemoguće tradicionalnim pristupom. Na slici 3-4. strujnicama i kartama protoka prikazano je uravnoteženje uzorka postepenom promjenom dobava kako bi se dobila jednoličnija raspodjela strujnica (Thiele, 2005).



**Slika 3-4.** Postepena promjena dobava utiskivanja u svrhu dobivanja uravnoteženijeg uzorka drenažnih zona (Thiele, 2005)

Batycky et al. (2008) su umjesto za simulaciju protoka koristili strujnice za izradu modela za nadziranje procesa zavodnjavanja. Model se zasnivao na WAF-ovima i uzorcima centriranim na utisnim bušotinama. Svoj pristup usporedili su s klasičnim pristupom koji se oslanja na fiksne uzorke i geometrijski određene dobave. Pokazalo se kako model baziran na strujnicama daje bolju sliku stvarne učinkovitosti utisnih bušotina zbog preciznije procjene dodatne proizvodnje nafte. Također, usporedili su rezultate svog pristupa s robusnijim modelima s potpuno usklađenim historijatima (*engl. history matched*) te su zaključili kako je za izradu modela slične preciznosti dovoljno znati samo primarne efekte protoka, lokacije bušotina, prijašnje dobave i bitnije geološke značajke.

Batycky i Thiele (2016) naveli su neke prednosti korištenja strujnica za nadziranje zavodnjavanja starijih polja, kao npr. da dozvoljavaju inženjerima da brže i efikasnije donose odluke o upravljanju proizvodnjom. Također kod nadziranja pomoću strujnica, za razliku od numeričkih modela s ćelijama poznatih volumena, uzorci se definiraju automatski iz podataka o proizvodnji i strujnica, računavaju se dinamičke promjene protoka i uzoraka, dobivaju se podaci o pojedinim bušotinama poput WAF-ova i učinkovitosti, te je moguća primjena na zavodnjavanje vodom, CO<sub>2</sub> ili kemijsko zavodnjavanje.

Thiele et al. (2008) proširili su simulator strujnica na mogućnost modeliranja zavodnjavanja polimerima na razini cijelog ležišta. Kod zavodnjavanja polimerom potrebno je pravilno simulirati in-situ distribuciju koncentracije polimera te pritom paziti na svojstva polimera poput povećavanja viskoznosti vode i gubitak polimera zbog adsorpcije. Ovaj pristup je testiran na ustanovljenim fizikalnim modelima sa svrhom dobivanja učinkovitosti zamjene fluida te su se rezultati slagali s tradicionalnim simulatorima koji su bili deset puta sporiji. AlSofi, LaForce i Blunt (2009) proučavali su efekte pseudoplastičnosti na učinkovitost obuhvata i iscrpak kod zavodnjavanja polimerima tako što su proširili simulator strujnica da razlikuje Newtonske i ne-Newtonske fluide. Rezultati simulacije dobiveni na 2D heterogenom modelu pri stabilnom zavodnjavanju su pokazali da se korištenjem smično-razrjeđujućeg fluida potreban volumen za utiskivanje povećao dva puta te se konačni iscrpak smanjio za 2% u usporedbi s Newtonskim fluidom. Clemens, Abdev i Thiele (2010) kombinirali su mogućnosti simulatora strujnica za simulaciju zavodnjavanja polimerom i definiranja uzoraka za učinkovitije upravljanje projektom utiskivanja polimera. Podjelom grupa proizvodnih i utisnih bušotina na manje ili više učinkovite preko omjera kumulativne proizvodnje nafte i volumena utisnutog polimera, uspješno su prilagodili dobave, koncentracije i veličine obroka polimera te tako povećali lokalne efikasnosti zavodnjavanja. Rezultati simulacije polja u Rumunjskoj pokazali su povećanje iscrpka od 5,3% u odnosu na zavodnjavanje čistom vodom.

Nielsen et al. (2010) prvi su razvili matematički model mikrobiološkog EOR-a (*engl. enhanced oil recovery*) u kojemu se reaktivan transport kombinira s komponentnim pristupom. Model opisuje zamjenu nafte vodom koja sadrži bakterije, supstrat te produkt djelovanja bakterija, najčešće surfaktant koji smanjuje međupovršinsku napetost na granici nafte i vode, smanjuje rezidualno zasićenje naftom te tako osigurava veći iscrpak. Svoj model implementirali su u simulator strujnica s uključenom gravitacijom, razdvajanjem

protoka od reaktivnog transporta preko IMPEC okvira (implicitan proračun tlaka, eksplicitan proračun kompozicije) te rješavanjem oba procesa istovremeno po strujnicama. Rezultati ovog simulatora bili su usporedivi s tradicionalnim simulatorom ali sa povećanim i bržim iscrpkom.

### 3.3. Usklađivanje historijata

U svakom slučaju usklađivanje historijata relativno je monoton ali nužan proces kroz kojeg ležišni inženjeri moraju proći prije ikakvog planiranja ili predviđanja. Usklađivanje historijata je inverzan problem koji zahtjeva brojne simulacije, često je ne linearan i neprecizno postavljen te i dobivena rješenja često nisu trivijalna. Glavne prednosti simulacije strujnicama pri usklađivanju historijata su: mogućnost povezivanja strujnica s individualnim bušotinama, ocrtavanje volumena povezanih s tim bušotinama, brzina i efikasnost simulacije koji omogućavaju češće promjene modela, i simulacija modela s više ćelija između bušotina što dovodi do preciznijih predviđanja.

Prema Al-Najem et al. (2012) postoje četiri pristupa korištenju strujnica za usklađivanje historijata:

1. ocrtavanje drenažnih zona
2. izravna metoda
3. metoda optimizacije
4. metoda integracije podataka.

Drenažne zone mogu biti vrlo kompleksne, a mogu i značajno varirati tijekom životnog vijeka ležišta što se strujnicama može lako identificirati. Ako se neka proizvodna bušotina ne slaže s historijatom, strujnice mogu asociirati to neslaganje s petrofizičkim svojstvima u odabranoj drenažnoj zoni. Posebnost ovog pristupa je što se ne oslanja na matematičke algoritme pri usklađivanju nego očekuje od inženjera da donese iskustvenu odluku o promjeni geoloških parametara modela. Emanuel i Milliken (1998) prvi su primijenili ovaj pristup na dva slučaja s preko 60 bušotina te su oba slučaja rezultati bili zadovoljavajući nakon samo nekoliko iteracija.

Izravna metoda usklađuje historijate koristeći krivulje frakcijskog protoka proizvodnih bušotina koje stavlja u odnos s promjenama efektivne propusnosti i/ili poroznosti, a prvi su je razvili Wang i Kovaček (2000). Autori su testirali ovaj pristup na

četiri dvofazna slučaja, zanemarujući gravitaciju i kompresibilnost, i zaključili da se najbolji rezultati dobivaju na ležištima s dominantnom heterogenosti. Agarwal i Blunt (2001) i Agarwal i Blunt (2003) primijenili su izravnu metodu sa trofaznim simulatorom strujnica uključujući i utjecaj gravitacije na usklađivanje historijata na poljima u Saudijskoj Arabiji i Sjevernom moru te su dobili prihvatljive rezultate koje su iskoristili za predviđanje budućeg ponašanja ležišta. Nedostatak ovog pristupa je mogućnost značajnog odstupanja krajnjeg geološkog modela od primarnih geoloških podataka.

Vasco, Yoon i Datta-Gupta (1998) povezali su simulaciju strujnica i tehnologiju povlačenja zraka (*engl. ray tracing*) u seizmologiji te su razvili optimizacijsku metodu usklađivanja historijata. Ova metoda analitički rješava koeficijente osjetljivosti proteklog vremena (TOF) u pogledu petrofizičkih svojstava ćelija. Varijabla proteklog vremena zatim se može povezati s probom utiskivanog fluida ili markera (*engl. tracer*). Optimizacijska metoda vrlo je efikasna zahvaljujući analitičkom rješavanju koeficijenata osjetljivosti. Autori su ovim pristupom usklađivali historijat polja u zapadnom Texasu sa 42 bušotine korištenjem udjela vode za karakterizaciju poroznosti i propusnosti ležišta.

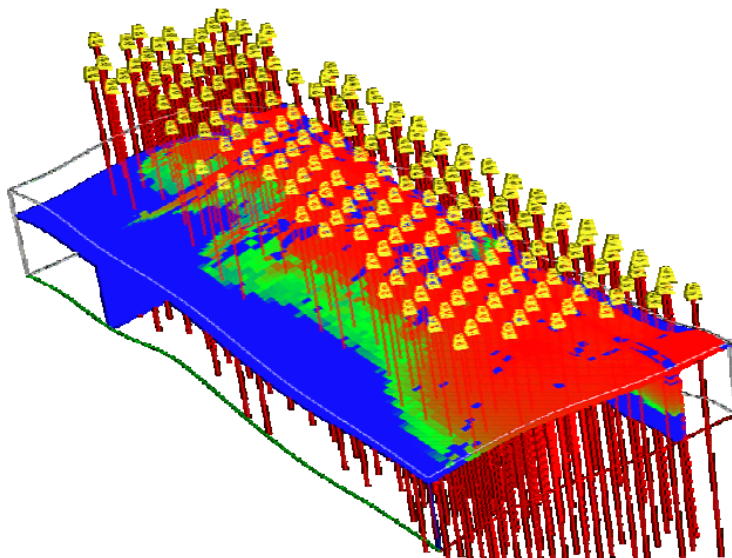
Metoda integracije podataka proizašla je iz izravne metode, no umjesto izravnih modifikacija modela potrebne promjene inkorporirane su u proces geomodeliranja, pa se može zvati i „geološki konzistentnom“ metodom. Prva primjena opisana je u radu Caers et al. (2002) koji su prilagodili pristup iz Wang i Kovscek (2000) modificiranjem geološkog modela ali istovremeno zadržavanjem prostornih korelacija svojstava ćelija. Sličan pristup predložili su Le Ravalec-Dupin i Fenwick (2002) koji su razvili postupak koji kombinira usklađivanje historijata strujnicama i geostatističku parametrizaciju radi procjene distribucija poroznosti i propusnosti u heterogenim ležištima. Postupak se sastoji od dva koraka, prvo poklapanje efektivnih propusnosti na strujnicama sa stvarnim podacima te zatim preslikavanje tih perturbacija na mrežu propusnosti. Ova metoda iznimno je računalno učinkovita zbog mogućnosti da simulacija protoka jednog fluida bude pokrenuta za grupu različitih modela.

Tanaka et al. (2015) predložili su novi polu-analitički pristup računanju osjetljivosti tlaka na dnu bušotine u odnosu na svojstva ćelija. Osjetljivost tlaka na dnu bušotina integrira se s osjetljivošću udjela vode, omjera nafte i plina ili kompozicije radi zajedničke inverzije historijata tlaka. Ovaj pristup iskorištava trajektorije strujnica te dobiva rezultate usporedive sa sličnim metodama, ali je mnogostruko računalno efikasniji. Također, moguće ga je

primijeniti sa simulatorom strujnica ali i s tradicionalnim simulatorom, na trofaznim i komponentnim sustavima. Autori su demonstrirali korisnost ovog pristupa na nekoliko primjera utiskivanja vode, plina ili CO<sub>2</sub> i primjenom na Norne polju u odobalju Norveške.

### 3.4. Rangiranje i procjena nepouzdanosti geoloških modela

Rangiranje detaljnih geoloških modela koji su bili preveliki za tradicionalan pristup u početku se činilo kao savršena primjena simulacije strujnicama zbog veće brzine simulacija i primjene manjeg broj fizikalnih veličina. Problem je što procjena geoloških modela nije samo jednostavna simulacija jednako prihvatljivih modela i odabir jednog od njih. Budući iscrpak ne ovisi samo o statičkom modelu nego može biti i funkcija fizike protoka, položaja bušotina i dobave bušotina, a i ekonomski faktor može stvoriti dodatne komplikacije. Gilman et al. (2002) predložili su praktičan postupak rangiranja geoloških modela na primjeru starog polja sa 60 godina proizvodnje. Uzeli su u obzir gravitaciju, kontakte fluida, promjene strujnica, efekte frakcijskog protoka, dobavu, utjecaj granica ležišta ali su bušotine postavili u pravilan raspored, ne reprezentativan stvarne situacije (Slika 3-5.). Postavljanjem bušotina da prekrivaju cijelo polje dobiva se kvalitetniji prikaz povezanosti ležišta tj. ističe se utjecaj geološke varijabilnosti i efekata koji će imati dugoročniji značaj pri donošenju odluka u budućnosti.



**Slika 3-5.** 3D model ujednačenog uzorka bušotina (Gilman et al., 2002)

Kovscek i Wang (2005) uspješno su upotrijebili simulator strujnica za procjenu nepouzdanosti modela sekvenciranja ugljikovog dioksida. Strujnice su se pokazale korisne

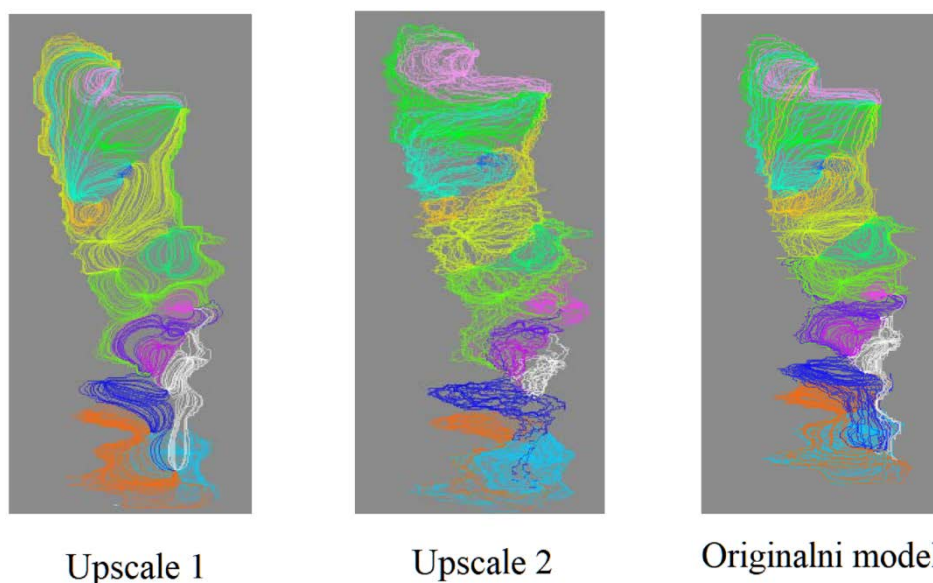
pri određivanju sličnosti i razlika različitih modela zato što njihove trajektorije predstavljaju trodimenzionalan protok u poroznom mediju. Naposljetku su dobili skupinu jednako zadovoljavajućih modela koji su kvalitetno prikazivali stvarnu geologiju ležišta.

Fanjul i Vicente (2013) proučavali su plinsko polje u Alžiru s obzirom na heterogenost, kvalitetu i povezanost ležišta te distribuciju fluida. Simulacijom strujnica optimizirali su simulacijsku mrežu modela i kvalitetnije prikazala bitna svojstva ležišta. Zaključili su da se simulacijom strujnica geološki modeli mogu analizirati i rangirani s obzirom na dinamičke performanse, koje učinkovito odražavaju povezanost ležišta, što je gotovo nemoguće tradicionalnom simulacijom. Također, uspjeli su bolje razumjeti povezanost ležišta i heterogenost zahvaljujući kvalitetnom prikazu efikasnosti volumetrijskog obuhvata i udjela vode.

BuKhamseen et al. (2016) također su koristili simulaciju strujnica za rangiranje ali ne geoloških modela nego utisnih bušotina. Namjera im je bila optimirati strategiju utiskivanja kombiniranjem simulacije strujnica i neizrazitu logiku (*engl. fuzzy logic*). Strujnice daju izvrstan uvid u povezanost bušotina, omogućuju određivanje učinkovitosti utiskivanja te identificiranje uzoraka s niskom učinkovitošću, visokim koeficijentom punjenja pornog prostora ili visokom proizvodnjom vode. Učinkovitost utiskivanja, udio vode i izgubljeni volumen utiskivanog fluida su ulazni parametri u sistem neizrazite logike koji ih rangira od najlošijih do najboljih. Sistem zatim izbacuje i indeks ranga utiskivanja (*engl. injection-ranking index, IRI*) za svaki uzorak bušotina i preporuča novu strategiju utiskivanja koja se ponovno simulira i procjenjuje s obzirom na rezultate. BuKhamseen et al. (2017) nadogradili su metodu iz svog prošlog rada te su osim već spomenutih parametara u sistem neizrazite logike uključili i operativna ograničenja i broj podržanih proizvodnih bušotina u uzorku. Obje metode isprobane su na velikim modelima s više desetaka milijuna ćelija te su rezultati pokazali značajna poboljšanja učinkovitosti utiskivanja, smanjenje zahtjeva utiskivanja, kvalitetniji obuhvat ležišta i održavanje tlaka bez negativnog utjecaja na proizvodnju nafte.

### 3.5. Homogenizacija modela

Strujnice se za homogenizaciju (*engl. upscaling*) mogu koristiti na dva načina: (1) za ocjenu najbolje strategije homogenizacije ili za generiranje svojstava homogeniziranog modela. Što se tiče ocjenjivanja strategije, značajan je rad Samier et al. (2002) u kojemu su razmatrali dodatne prednosti strujnica pored generiranja preciznih (*engl. fine-scale*) modela za usporedbu. Pretpostavili su kako će se homogenizirani dinamički model ponašati kao i početni (precizni) ukoliko bušotine dreniraju slične volumene i ti volumeni bi trebali biti povezani na sličan način. Strujnicama se dobivaju informacije upravo o tome. Uspoređujući povezane volumene na individualnim bušotinama u nekom vremenu autori su prikazali novi pristup analizi relativnih performansi algoritama za povećanje rezolucije modela. Prednost korištenja strujnica je u mogućnosti brze vizualne procjene uspješnosti povećanja rezolucije modela. Slika 3-6. pokazuje usporedbu dvije metode povećanja rezolucije modela s originalnim modelom te se može primijetiti kako se u oba slučaja samo određeni dijelovi ležišta poklapaju sa originalom.



**Slika 3-6.** Usporedba homogeniziranih modela s originalnim preko drenažnih zona prikazanih strujnicama (Samier et al., 2002)

Christie i Clifford (1997) i Portella i Hewett (2000) su koristeći simulaciju strujnica razvili nove metode povećanja rezolucije modela. U oba rada dobiveni rezultati dobro su se slagali s originalnim modelima te su oba autora istaknuli brzinu simulacije strujnica kao značajnu prednost.

### 3.6. Odabir lokacija bušotina

Prilikom razvojne faze ležišta i bušenja proizvodnih bušotina potrebno je pravilno odabrati lokacije tih bušotina kako ne bi došlo do interferencije drenažnih zona te kako bi se povećao i ubrzao ukupni iscrpак nafte. Također, u slučaju starijih polja potrebno je pravilno izabrati lokacije bušenja dodatnih (*engl. infill*) bušotina ili odabrati koje proizvodne bušotine prenamijeniti u utisne. Simulacija strujnica korisna je u oba slučaja.

Dehdari et al. (2008) razvili su metodologiju optimizacije ležišta u Iranu koristeći tradicionalnu kompozicijsku simulaciju u kombinaciji sa simulacijom strujnica. Veći dio ležišta simulirali su tradicionalnom simulacijom dok se strujnice iskoristili za optimizaciju i ubrzanje procesa te identifikaciju lokacija novih bušotina i drenažnih zona. Ovom metodologijom definirali su nekoliko scenarija maksimizacije proizvodnje nafte te su zaključili da je primjena simulacije strujnica bila zaslužna za dodatni iscrpак nafte od 3,5 milijuna m<sup>3</sup>.

Sayyafzadeh, Pourafshary i Rashidi (2010) iskoristili su informacije koje pruža simulacija strujnica u dva koraka. Prvo, smjestili su dodatne bušotine u dijelove ležišta s najmanjom gustoćom strujnica i najvećim zasićenjem nafte. Drugo, na temelju gustoće strujnica oko proizvodnih bušotina odlučili su koje od njih je najbolje prenamijeniti u utisne bušotine. Primjenom ovog pristupa, rezultati simulacije pokazali su povećanje konačnog iscrpka nafte za 70% što je usporedivo s EOR projektima ali s nižim kapitalnim i operativnim troškovima.



## 4. POSTAVLJANJE MODELA U SIMULATORU STRUJNICA FRONTSIM

FrontSim je trodimenzionalni, trofazni, tablično definirani (engl. *black oil*, BO) i komponentni simulator strujnica. Temelji se na IMPES (engl. *implicit pressure explicit saturation*) formulaciji, koja se koristi i u tradicionalnim numeričkim simulatorima koji rješavaju matricu diferencijalnih jednadžbi metodom konačne razlike (engl. *finite difference*, FD) ili (češće) metodom konačnih volumena (engl. *finite volume*, FV, ovu metodu koriste i Schlumberger Eclipse simulatori), ali s razlikom da se transport fluida i zasićenja rješavaju po strujnicama u jednodimenzionalnom prostoru. Visoko učinkovit i ne disperzivan algoritam određivanja potencijala napredovanje fronte stanovite faze (engl. *front-tracking algorithm*) koristi se za rješavanje dvofaznih, ne-mješivih procesa, npr. istiskivanja nafte vodom. Sustave fluida koji su definirani BO (tablično) ili COMP (sastavom i jednadžbom stanja) modelom rješava potpuno implicitan, prilagodljiv implicitan (engl. *adaptive implicit*) ili IMPES solver, dok se eksplicitna metoda može koristiti za trofazne BO sustave. Schlumberger User Guide 2019 navodi kako je simulacija strujnica vrlo fleksibilna, npr. pri karakterizaciji protoka geoloških modela, gravitacija se može isključiti i strujnice se generiraju samo jednim rješenjem tlaka, a pri simulaciji zavodnjavanja mogu se koristiti solver napredovanja fronte ili eksplicitni solver zasićenja radi smanjenja numeričke disperzije.

Simulacija strujnica bazirana je na istim parcijalnim diferencijalnim jednadžbama protoka fluida u šupljikavom mediju kao i tradicionalni simulatori konačne razlike (FD), ali simulatori strujnica koriste različitu računsku formulaciju. Simulacija strujnica nekoliko je redova veličina brža od FD ili FV simulacije za ne stlačive ili slabo stlačive protoke u kojima dominira heterogenost. To je zbog mogućnosti metode strujnica da radi veće vremenske korake i usprkos tome daje točna rješenja, za razliku od FD metoda koje su značajno ograničene veličinom koraka. Ova prednost raste eksponencijalno s veličinom geološkog modela. Na veličinu koraka najviše utječu stupanj ovisnosti tlaka o promjenama zasićenja i promjene bušotinskih brzina protjecanja.

Kod simulacije strujnica samo se tlak rješava implicitno, koristeći iterativne metode, što značajno umanjuje resurse potrebne za rješavanje većih problema. Nakon postignutog rješenja za tlak generiraju se strujnice koje prikazuju protok u ležištu. Svaka strujnica

predstavlja konstantni volumni protok i djeluje kao jednodimenzionalni prostor za solver zasićenja. Fronte linija jednakih zasićenja se pomiču po strujnicama manjim inkrementalnim vremenskim koracima koji su izvedeni podjelom koraka za tlak na manje dijelove. Također, pomicanje zasićenja po strujnicama znači da rezultirajuća distribucija zasićenja nije pod utjecajem orijentacije mreže ćelija. Redukcija trodimenzionalnog problema na skupinu jednodimenzionalnih problema osigurava visoku učinkovitost pri rješavanju vrlo preciznih, velikih geoloških modela. Pošto u zonama visokog protoka ima više strujnica nego u zonama niskog protoka, mogućnost pravilne distribucije optimalnog broja strujnica pri rješavanju problema pridodaje sveukupnoj učinkovitosti simulatora. Na kraju svakog koraka zasićenja se mapiraju iz jednodimenzionalnog prostora strujnica u ćelije modela te se isti proces ponavlja za svaki sljedeći korak (Schlumberger, 2019b).

#### **4.1. Datoteke i ključne riječi**

Simulacija strujnica u programu FrontSim definira se različitim ulaznim datotekama, neke od kojih se mogu napraviti s željenim pre-procesorskim programima, a nakon simulacije dostupne su razne izlazne datoteke, koje su ulazni set podatka za pregled rezultata u odabranom post-procesoru (Slika 4-1.). Sve ulazne i izlazne datoteke mogu se podijeliti u tri skupine: tekstualne datoteke (za čiji pregled nije neophodan post-procesorski program), binarne 3D vizualizacijske datoteke i binarne datoteke linijskih grafova (Schlumberger, 2019b).

Tekstualne datoteke su sljedećih ekstenzija:

- .DATA – glavna ulazna datoteka u koju se druge datoteke mogu umetnuti ključnom riječi INCLUDE
- .PRT – sadrži dnevnik simulacije, izvješće o fluidima i tlakova u ležištu, izvješće o tlakovima i dobavama na bušotinama i alokacijsko izvješće, a kontrolira se ključnom riječi RPTSCHED
- .ALLOC – sadrži alokacijske faktore i drenažne volumene bušotina i parova bušotina, a kontrolira se ključnom riječi RPTSCHED

- .ALN – sadrži formatirane izlazne informacije radi boljeg povezivanja s programima poput OilField Manager ili MS EXCEL, a kontrolira se ključnom riječi RPTALLOC
- .FSCAT – koristi format programa PETREL radi spremanja informacija za prikaz modela u Petrelu, a za stvaranje ove datoteke potrebna je ključna riječ GEOFLOPS
- .MSG – ovo je ASCII (*engl. American Standard Code for Information Interchange*) datoteka formatirana u XML (*engl. Extensible Markup Language*) formatu te sadrži sve poruke, upozorenja, pogreške i dr. iz simulacije i poziva se ključnom riječi MSGFILE
- .PFM\_SCHED – sadrži sve podatke o dobavi iz upravljanja zavodnjavanjem (*engl. Patter Flood Management, PFM*) koji su navedeni ključnim riječima WCONPROD, WCONINJE i DATES
- .RSM – sadrži sažetak simulacije (*engl. Run Summary, RSM*) u EXCEL, XML ili ECLIPSE formatu, a podešava se ključnom riječi OPTIONFS
- .RFT – sadrži podatke o jednoj ili više bušotina i svojstva fluida u bušotini ili u povezanim ćelijama pri odabranim vremenima u simulaciji, a generira se ključnom riječi WRFTPLT

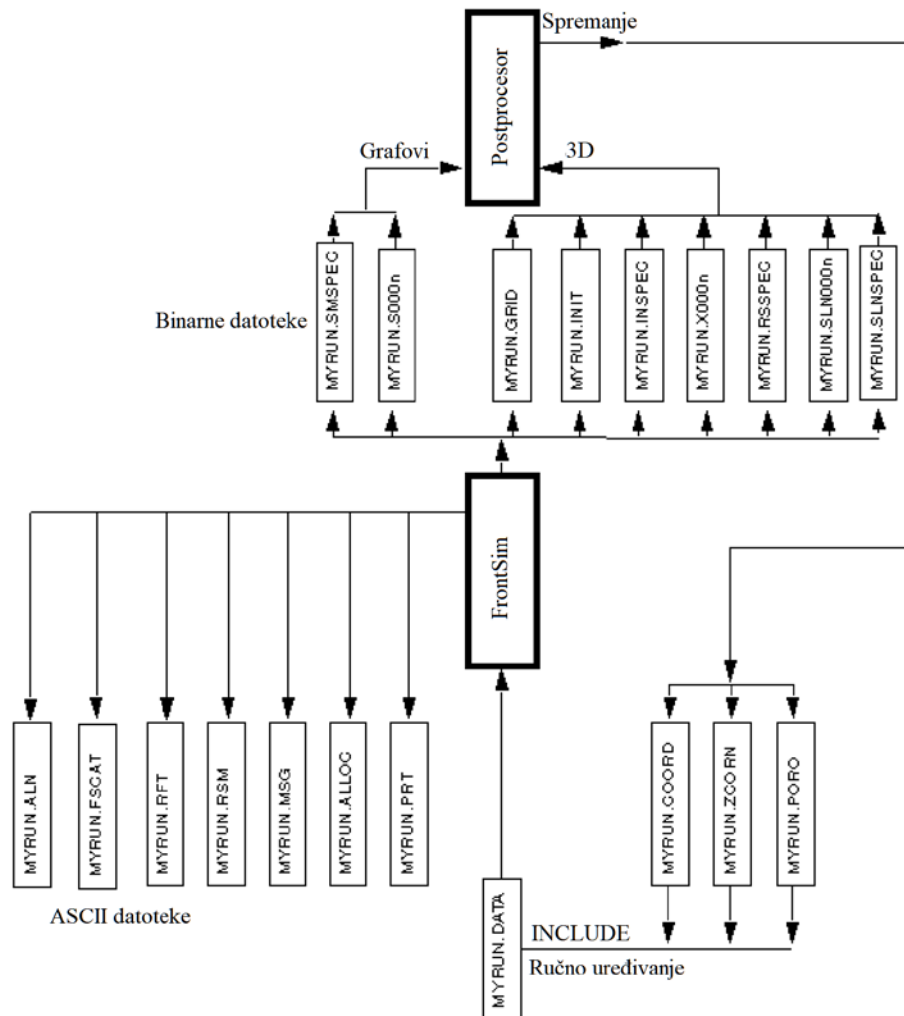
3D vizualizacijske datoteke su sljedeće:

- .GRID – sadrži koordinate rešetke
- .INIT – sadrži geološka i ostala slična svojstva
- .INSPEC – sadrži popis oznaka za početnu datoteku
- .X000n – sadrže skupove zasićenja i sve ostalo potrebno za ponovno pokretanje simulacije u slučaju preranog završetka ili nastavka nakon odabranog koraka
- .UNRST – ujedinjena datoteka za ponovno pokretanje simulacije, može zamijeniti .X000n datoteke
- .RSSPEC – sadrži popis oznaka za datoteku za ponovno pokretanje simulacije

- .SLN000N, PRIMJER.SLNSPEC – svaka .SLN datoteka sadrži geometriju i svojstva strujnica za određeni korak od 0001 do 9999, dok .SLNSPEC datoteka sadrži iste podatke ali koji vrijede za cijelu simulaciju, zajedno navedene datoteke sadrže dovoljno informacija za vizualizaciju strujnica bez potrebe za ikom drugim podacima o geometriji ili svojstvima

Datoteke linijskih grafova su sljedeće:

- .SMSPEC – sadrži imena i sl. o proizvodnji iz simulacije
- .S000n – sadrži vrijednosti proizvodnje iz simulacije
- .UNSMRY – ujedinjena datoteka podataka o proizvodnji, može zamijeniti .S000n datoteke



**Slika 4-1.** Shema komunikacije FrontSim-a s pre i post procesorima preko datoteka (Schlumberger, 2019b)

#### **4.1.1. Pregled „DATA“ datoteke**

.DATA datoteka je osnovni dio definicije modela i tijekom simulacije preko koje se upravlja cijelim procesom. Pomoću nje su moguće promjene uvjeta simulacije, svojstava fluida i ležišta itd. Sastoji se od najviše osam sekcija te se u svakoj od njih određeni dio simulacije opisuje ključnim riječima posebnim za svaku sekciju. Sve sekcije moraju biti napisane po redu u kojem su nabrojane i slijede konvencije sintakse slične onima u FORTRAN datotekama, iz razloga jer većina simulacijskih aplikacija tvrtke Schlumberger (ali i drugih kompanija) sadrži izvorne algoritme (računalni kod) programirane u programskom jeziku FORTRAN. Također se preporuča sadržaj pojedinih sekcija organizirati u zasebnim datotekama korištenjem ključne riječi INCLUDE.

RUNSPEC ključna riječ započinje prvu sekciju u kojoj se nalaze naslov simulacije, dimenzije, prisutne faze fluida itd. Ključna riječ GRID označuje drugu sekciju koja specificira geometriju simulacijske rešetke i svojstva stijena poput poroznosti, apsolutne propusnosti i dr. u svakoj ćeliji. EDIT sekcija nije obavezna te može sadržavati modifikacije izračunatih pornih volumena, dubine središta ćelija i transmisibilnosti. U sekciji PROPS nalaze se tablice svojstava stijena i fluida kao funkcije tlakova fluida i zasićenja, npr. gustoća, viskoznost, relativna propusnost. REGIONS je još jedna neobavezna sekcija kojom se rešetka možda podijeliti u određene regije za proračun samo jednog od navedenog: PVT svojstva (gustoće i viskoznosti fluida), svojstva vezana uz zasićenje kao relativne propusnosti, početni uvjeti (tlak i zasićenja) ili volumen fluida u ležištu. Bez ove sekcije sve ćelije se nalaze u istoj regiji. SOLUTION sekcija sadrži početne uvjete u ležištu koji mogu biti izračunati pomoću dubine kontakta fluida ili očitani iz RESTART datoteke iz prethodne simulacije. Pod SUMMARY sekciju, koja je također neobavezna, navode se podaci koji se žele ispisati u SUMMARY datoteku nakon svakog koraka. SCHEDULE sekcija specificira procese koji će se simulirati (kontrola i ograničenja proizvodnje i utiskivanja) te vremena u kojima su potrebna izlazna izvješća. Parametri kojima se podešava simulacija također se pišu pod SCHEDULE sekciju. (Schlumberger, 2019b)

## 5. PRIMJER SIMULACIJE PLINSKO-KONDENZATNOG POLJA LAGO STRUJNICAMA

Ležište Lago je predstavljeno vapnencima donjomiocenske starosti zasićenima plinom, a prema geološkom rješenju, ispresijecano je s desetak rasjeda. Prisutna je intragranularna i intraskeletna šupljikavost, dok je vrlo visoka primarna intergranularna šupljikavost smanjena procesom cementacije. Prosječna šupljikavost (ukupna primarna i sekundarna) iznosi 11,8 %, srednje početno zasićenje vodom 42,4%, propusnost temeljem ispitivanja na jezgri je 1 mD te u smjeru z iznosi 10% vertikalne propusnosti, a srednja efektivna debljina ležišta je 41,26 m.

Početni ležišni tlak je 394 bar, 52% veći od hidrostatskog. Kontakt plin-voda utvrđen je ispitivanjem i analizom karotažnih mjerenja se nalazi na dubini od 2525 metara. Gustoća kondenzata je 823,89 kg/m<sup>3</sup>, plina 1,31 kg/m<sup>3</sup> i ležišne vode 1022,1 kg/m<sup>3</sup>, a salinitet ležišne vode iznosi 30,0 g(NaCl)/l. Sastav i svojstva fluida (referentni tlakovi, volumni faktori, viskoznosti, kompresibilnost vode) zadani su preko PVT tablica koje su izvezene iz pred procesora PVTi. Pretpostavljene su tipske krivulje relativnih propusnosti, kao i korelacije za kompakciju stijene.

U simulaciji se nastojalo što više reproducirati stvarne uvjete, međutim, zbog optimizacije vremena ali i samog cilja rada, koji je bio okvirno demonstrirati mogućnosti primjene prikaza pomoću strujnica, originalni geološki model od preko pola milijuna ćelija je reduciran na 7560 ćelija (28 ćelija u smjeru x, 30 u smjeru y, a 9 u smjeru z), pri čemu su svojstva koja su bila prisutna u modelu homogenizirana.

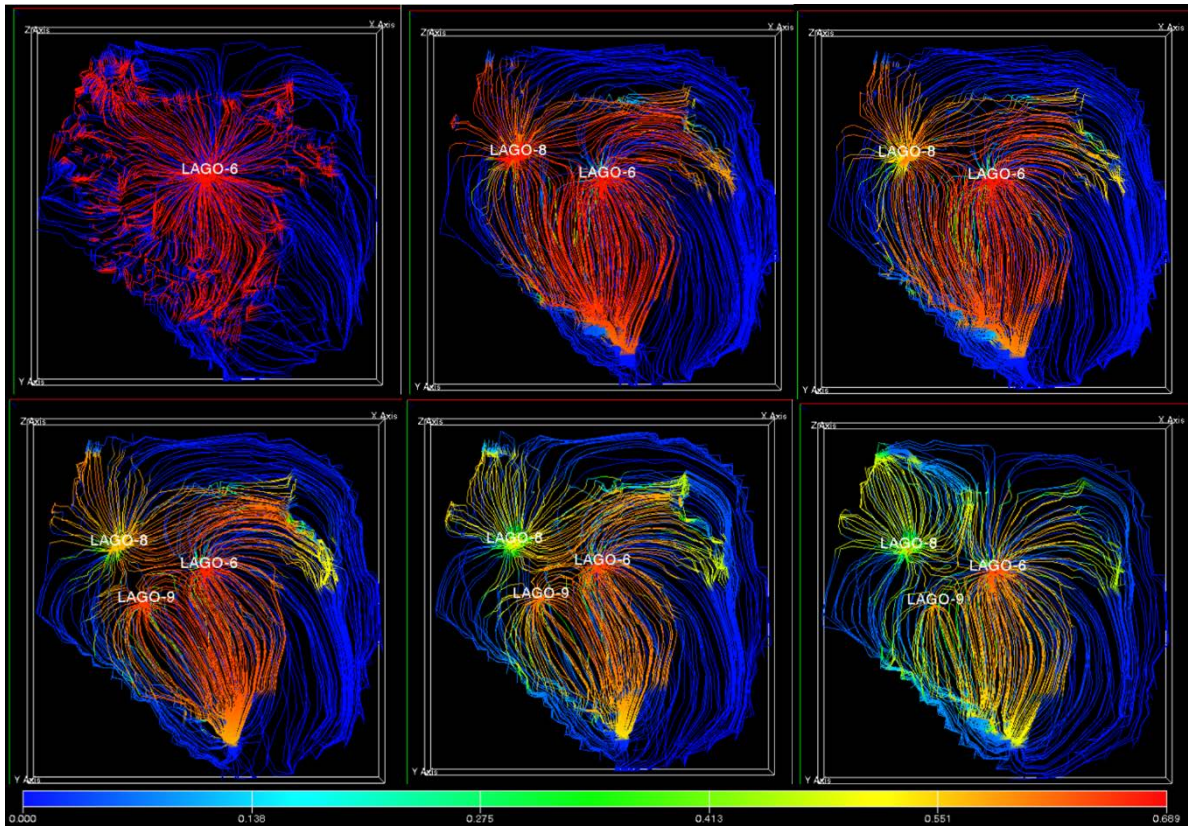
Opremanje svih triju bušotina je tipsko, pri čemu je posljednja kolona ugrađena iznad krovine ležišta. Režim proizvodnje je zadan prema povijesnim podacima i kontrolira se protokom plina. Ukupno simulirano vrijeme proizvodnje je 17 godina.

## 5.1. Analiza rezultata simulacije

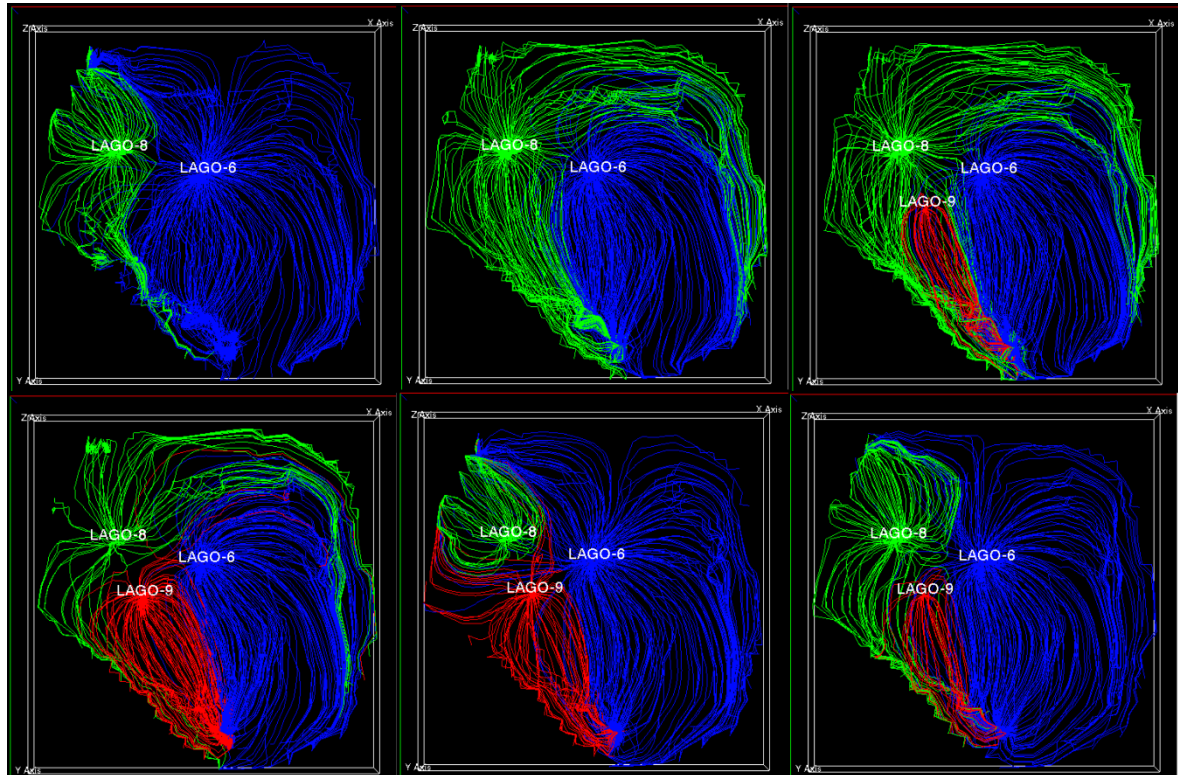
Nakon završetka simulacije u FrontSim-u bitni rezultati se mogu pregledati u dva post procesora, ECLIPSE Office i FloViz. Za oba programa parametri koje se želi prikazati moraju se navesti pri izradi simulacijskih datoteka.

U Office-u se mogu prikazati promjene raznih parametara s vremenom u obliku grafova, na razini ležišta, grupe bušotine ili pojedine bušotine. U dodacima su prikazani slijedeći parametri na razini ležišta: količina fluida (plina, kondenzata ili vode) u ležištu, dobava fluida, kumulativna proizvodnja fluida, plinski faktor, udio vode u proizvodnji i tlak. Pokazalo se da se dobivene vrijednosti navedenih parametara ne podudaraju u potpunosti s povijesnim podacima ali ih barem trendovski prate. Razlika simuliranih i stvarnih podataka proizlazi iz pojednostavljenog geološkog modela korištenog u ovom primjeru koji se pokazao dovoljno dobar da istakne vrijednost informacija dobivenih strujnicama ali ne i za dobivanje apsolutno točnih rezultata, što i nije bilo cilj ovog rada.

Za prikaz rešetke i strujnica korišten je FloViz gdje se u 3D prikazu mogu vidjeti razna svojstva u svakom od zadanih koraka. U ovom primjeru zatražen je izvještaj jednom mjesečno, pa ukupno ima 227 koraka od kojih je ovom radu radi preglednosti prikazano šest najreprezentativnijih. Na slici 5-1. može se vidjeti smanjenje zasićenja plinom u određenim dijelovima ležišta na kontinuiranoj višebojnoj skali u rasponu od 0 do 0,689 te kako se to smanjenje ubrzava uključivanjem dodatnih bušotina. Na slici 5-2. prikazane su drenažne zone pojedinih bušotina tj. iz kojeg dijela ležišta proizvodi određena bušotina. Strujnice povezane s bušotinom LAGO-6 obojane su plavom bojom, one povezane s bušotinom LAGO-8 su zelene boje, a strujnice bušotine LAGO-9 su crvene boje. Drenažne zone mijenjaju se sa svakim korakom zbog različitih režima proizvodnje tj. zbog promjene tlaka i različitih dobava fluida u svaku bušotinu.



Slika 5-1. Zasićenje ležišta plinom u šest različitih koraka simulacije



Slika 5-2. Drenažne zone bušotina u šest različitih koraka simulacije



## 6. ZAKLJUČAK

Kroz istraživanje literature, te na realnom primjeru, pokazano je kako je simulacija ležišta strujnicama komplementarna i nadopunjujuća tradicionalnom numeričkom načinu simulacije s modelom ćelija poznatih volumena, pružajući nove informacije i perspektive od kojih je najvažnija vizualizacija protoka.

Nekoliko zaključaka se može donesti na temelju prikaza promjene zasićenja plinom preko strujnica. Uobičajeno je da se zasićenje primarnim proizvodnim fluidom smanjuje tijekom proizvodnje, no pomoću strujnica se može vidjeti gdje točno dolazi do zaostajanja fluida. U datom primjeru vidi se kako je i na kraju simulacije, u šestom prikazanom koraku, najveće zasićenje plinom još uvijek oko bušotine LAGO-6 te u dijelu ležišta ispod nje, iako je ona prva počela s radom. Iz navedenog je moguće zaključiti da se u tom dijelu ležišta nalazi određena količina plina koju se nije uspjelo proizvesti zbog lošijih performansi bušotine LAGO-6 ili zbog veće početne količine plina u tom području. U svakom slučaju pomoću strujnica moguće je pronaći rješenje tog problema te kvantificirati performanse bušotina. Promjenom režima proizvodnje i ponavljanjem simulacije, metodom pokušaja i pogrešaka, može se pronaći optimalan režim kojim bi se proizvela maksimalna količina plina, a olakšano je planiranje strategije postavljanja novih bušotina ili novih operativnih uvjeta za postojeće bušotine.

Drugi set informacija koji je demonstriran simulacijom strujnicama odnosi se na drenažne zone bušotina i njihove promjene kroz vrijeme. Za razliku od prikaza zasićenja gdje je prikaz strujnicama precizniji, ali se može dobiti i tradicionalnom simulacijom, prikaz drenažnih zona jedinstven je za simulaciju strujnicama. U ovom primjeru drenažne zone su se u određenim koracima značajno mijenjale zbog utjecaja različitih tlakova i dobava svake bušotine te se lako primijete dominantnost i podbacivanje određenih bušotina, npr. dominantnost bušotine LAGO-8 u drugom i trećem prikazanom koraku te bušotine LAGO-9 u petom prikazanom koraku i podbacivanje bušotine LAGO-9 u zadnjem, šestom prikazanom koraku. Kada bi uzorak drenažnih zona bio uravnoteženiji istovremeno bi i proizvodnja bila stabilnija, a time i efikasnija pošto bi svaka bušotina proizvodila približno jednaku količinu fluida. Rješenje problema neuravnoteženih drenažnih zona istovjetno je rješenju problema nesavršene distribucije zasićenja plinom, iterativna promjena režima proizvodnje do dobivanja zadovoljavajućih rezultata.

Simulacija strujnica pokazala se vrlo korisnom pri primjeni na procese koji se teže simuliraju tradicionalnom simulacijom.

Za simulaciju proizvodnje iz plinsko-kondenzatnog polja u primjeru korišten je Schlumberger-ov simulator strujnica FrontSim. Svojstva ležišta i fluida, režim proizvodnje te željeni izlaz simulacije navedeni su u nekoliko odgovarajućih datoteka, a rezultati su prikazani pomoću dva post procesora, FloViz za vizualizaciju strujnica i Office za prikaz grafova.

Finalno, potrebno je ukazati kako se model strujnica oslanja na već izrađeni model s ćelijama poznatih volumena, a teorijske postavke i publikacije u znanstvenim časopisima ne otkrivaju poteškoće pri definiciji modela strujnica za realno kompleksno ležište. U tom smislu, dokumentacija za komercijalni simulator strujnica FrontSim je šturija nego za ostale Schlumberger-ove simulatore, primjeri su teže primjenjivi na realne sustave i samo testiranje i primjena takvog realnog modela strujnica predstavlja izazov za naftne inženjere, ali i za istraživače.

## 7. LITERATURA

1. Abdullah, A. A. N. *et al.* (2016) ‘Streamline information guided by fuzzy logic to optimize field injection/production strategies’, *Society of Petroleum Engineers - SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition*. doi: 10.2118/182742-ms.
2. Agarwal, B. and Blunt, M. J. (2001) ‘Full-Physics, Streamline-Based Method for History Matching Performance Data of a North Sea Field’. doi: 10.2118/66388-ms.
3. Agarwal, B. and Blunt, M. J. (2004) ‘A streamline-based method for assisted history matching applied to an Arabian gulf field’, *SPE Journal*, 9(4), pp. 437–449. doi: 10.2118/84462-PA.
4. Al-Najem, A. A. *et al.* (2012) ‘Streamline simulation technology: Evolution and recent trends’, *Society of Petroleum Engineers - SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition 2012*, (April), pp. 696–717. doi: 10.2118/160894-ms.
5. AlSofi, A. M., LaForce, T. C. and Blunt, M. J. (2009) ‘Sweep impairment due to polymers shear thinning’, *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, MEOS, Proceedings*, 2(March), pp. 834–845.
6. Batycky, R. P. *et al.* (2008) ‘Revisiting reservoir flood-surveillance methods using streamlines’, *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 11(2), pp. 387–394. doi: 10.2118/95402-pa.
7. Batycky, R. P., Blunt, M. J. and Thiele, M. R. (1997) ‘A 3D Field-Scale Streamline-Based Reservoir Simulator’, *SPE Reservoir Engineering (Society of Petroleum Engineers)*, 12(4), pp. 246–253. doi: 10.2118/36726-pa.
8. Batycky, R. P. and Thiele, M. R. (2016) ‘Technology Update: Mature Flood Surveillance Using Streamlines’, *Journal of Petroleum Technology*, 68(05), pp. 22–25. doi: 10.2118/0516-0022-jpt.
9. Bommer, P. M. and Schechter, R. S. (1979) ‘Mathematical Modeling of in Situ Uranium Leaching.’, *Journal of Microwave Power*, (December), pp. 53–66.
10. Bratvedt, F., Gimse, T. and Tegnander, C. (1996) ‘Streamline computations for porous media flow including gravity’, *Transport in Porous Media*, 25(1), pp. 63–78. doi: 10.1007/BF00141262.
11. BuKhamseen, N. Y. *et al.* (2017) ‘An injection optimization decision-making tool using streamline based fuzzy logic workflow’, *Society of Petroleum Engineers - SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and Exhibition, RCSC 2017*, pp. 872–883.
12. Caers, J. *et al.* (2002) ‘A geostatistical approach to streamline-based history matching’, *SPE Journal*, 7(3), pp. 250–266. doi: 10.2118/73144-PA.

13. Caudle B. (1966) 'SPE Lecture notes on reservoir engineering'.
14. Cheng, Hao *et al.* (2006) 'A rigorous compressible streamline formulation for two- and three-phase black-oil simulation', *SPE Journal*, 11(4), pp. 407–417. doi: 10.2118/96866-PA.
15. Cheng, H. *et al.* (2006) 'Compressible streamlines and three-phase history matching', *Proceedings - SPE Symposium on Improved Oil Recovery*, 1, pp. 255–268. doi: 10.2523/99465-ms.
16. Christie, M. A. and Clifford, P. J. (1997) 'Fast procedure for upscaling in compositional simulation', *Proceedings of the SPE Symposium on Reservoir Simulation*, pp. 105–113.
17. Clemens, T., Abdev, J. and Thiele, M. (2010) 'Improved polymer-flood management using streamlines', *Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 1(September), pp. 317–333. doi: 10.2118/132774-ms.
18. Dehdari, V. *et al.* (2008) 'SPE 112985 Well Spacing and Recovery Optimization of One of Iranian Oil Fields by Using Streamline and Reservoir Simulation', *Society*, i(Hurst 1987).
19. Di Donato, G., Huang, W. and Blunt, M. (2003) 'Streamline-Based Dual Porosity Simulation of Fractured Reservoirs', *Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, pp. 121–131. doi: 10.2523/84036-ms.
20. Emanuel, A. S. and Milliken, W. J. (1998) 'History matching finite difference models with 3D streamlines', *Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Sigma, pp. 171–179.
21. Fanjul, J. P. and Vicente, M. G. (2013) 'Reservoir connectivity evaluation and upscaled model screening using streamline simulation', *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, MEOS, Proceedings*, 2, pp. 1252–1273. doi: 10.2118/164312-ms.
22. Gilman, J. R. *et al.* (2002) 'Statistical Ranking of Stochastic Geomodels Using Streamline Simulation: A Field Application', *Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, pp. 425–435. doi: 10.2523/77374-ms.
23. Ingebrigtsen, L., Bratvedt, F. and Berge, J. (1999) 'Streamline based approach to solution of three-phase flow', *Proceedings of the SPE Symposium on Reservoir Simulation*, (2), pp. 253–260.
24. Jessen, K. . O. F. M. J. (2002) 'Compositional Streamline Simulation', in. San Antonio, Texas.
25. King, M. J. *et al.* (1995) 'Rapid evaluation of the impact of heterogeneity on miscible gas injection', *Geological Society Special Publication*, 84, pp. 133–142. doi: 10.1144/GSL.SP.1995.084.01.14.

26. Kovscek, A. R. and Wang, Y. (2005) 'Geologic storage of carbon dioxide and enhanced oil recovery. I. Uncertainty quantification employing a streamline based proxy for reservoir flow simulation', *Energy Conversion and Management*, 46(11–12), pp. 1920–1940. doi: 10.1016/j.enconman.2004.09.008.
27. Kozlova, A. *et al.* (2006) 'A three-phase compressible dual-porosity model for streamline simulation', *Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 4, pp. 2363–2372.
28. Martha, C. *et al.* (2007) 'A Fully Compositional Streamline Simulator', (1), pp. 1–10. doi: 10.2523/63156-ms.
29. Muskat, M. and Wyckoff, R. D. (1934) 'A Theoretical Analysis of Water-flooding Networks', *Transactions of the AIME*, 107(01), pp. 62–76. doi: 10.2118/934062-g.
30. Nielsen, S. M., Jessen, K. and California, S. (2010) 'SPE 131048 Microbial Enhanced Oil Recovery: 3D Simulation with Gravity Effects', *Adsorption Journal Of The International Adsorption Society*, (1990).
31. Pasarai, U., Arihara, N. and Waseda, U. (2005) 'Application of Streamline Method to Hot Waterflooding Simulation for Heavy-Oil Recovery'.
32. Pollock, D. W. (1988) 'Semianalytical Computation of Path Lines for Finite-Difference Models', *Groundwater*, pp. 743–750. doi: 10.1111/j.1745-6584.1988.tb00425.x.
33. Portella, R. C. M. and Hewett, T. A. (2000) 'Upscaling, gridding, and simulating using streamtubes', *SPE Journal*, 5(3), pp. 315–323. doi: 10.2118/65684-PA.
34. Prévost, M., Edwards, M. G. and Blunt, M. J. (2002) 'Streamline tracing on curvilinear structured and unstructured grids', *SPE Journal*, 7(2), pp. 139–148. doi: 10.2118/78663-PA.
35. Le Ravalec-Dupin, M. and Fenwick, D. H. (2002) 'A Combined Geostatistical and Streamline-Based History Matching Procedure', *Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, pp. 467–473. doi: 10.2523/77378-ms.
36. Samier, P., Quettier, L. and Thiele, M. (2002) 'Applications of streamline simulations to reservoir studies', *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 5(4), pp. 324–332. doi: 10.2118/78883-PA.
37. Sayyafzadeh, M., Pourafshary, P. and Rashidi, F. (2010) 'Increasing ultimate oil recovery by infill drilling and converting weak production wells to injection wells using streamline simulation', *Society of Petroleum Engineers - International Oil and Gas Conference and Exhibition in China 2010, IOGCEC*, 4, pp. 2865–2871.
38. Schlumberger (2019a) 'FrontSim Technical Description'.
39. Schlumberger (2019b) 'FrontSim User Guide'.

40. Tanaka, S. *et al.* (2015) ‘Streamline-Based History Matching of Arrival Times and Bottomhole Pressure Data for Multicomponent Compositional Systems’. doi: 10.2118/174750-ms.
41. Tanaka, S., Datta-Gupta, A. and King, M. J. (2013) ‘A novel approach for incorporation of capillarity and gravity into streamline simulation using orthogonal projection’, *Society of Petroleum Engineers - SPE Reservoir Simulation Symposium 2013*, 2, pp. 894–910. doi: 10.2118/163640-ms.
42. Thiele, Marco R.; Batycky, Rod P.; Blunt, M. J. (1997) ‘A Streamline-Based 3D Field-Scale Compositional Reservoir Simulator.pdf’, in. San Antonio, Texas: Society of Petroleum Engineers, p. 12.
43. Thiele, M. R. *et al.* (1996) ‘Simulating Flow in Heterogeneous Systems Using Streamtubes and Streamlines’, *SPE Reservoir Engineering (Society of Petroleum Engineers)*, 11(1), pp. 5–12. doi: 10.2118/27834-PA.
44. Thiele, M. R. *et al.* (2004) ‘Extension of Streamline-Based Dual Porosity Flow Simulation to Realistic Geology’, (September 2004), pp. 1–15. doi: 10.3997/2214-4609-pdb.9.b035.
45. Thiele, M. R. (2005) ‘Streamline Simulation’, in *8th International Forum on Reservoir Simulation*, p. 48.
46. Thiele, M. R. *et al.* (2010) ‘Polymer-flood modeling using streamlines’, *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 13(2), pp. 313–322. doi: 10.2118/115545-PA.
47. Thiele, M. R. and Batycky, R. P. (2003) ‘Water Injection Optimization Using a Streamline-Based Workflow’, *Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, pp. 521–526. doi: 10.2118/84080-ms.
48. Thiele, M. R., Batycky, R. and Thomas, L. K. (2002) ‘Miscible WAG simulations using streamlines’, *Paper presented at 8th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery—Freiberg*, 3(September), p. 6.
49. Vasco, D. W., Yoon, S. and Datta-Gupta, A. (2009) ‘Integrating dynamic data into high-resolution reservoir models using streamline-based analytic sensitivity coefficients’, *SPE Reprint Series*, (December), pp. 389–399.
50. Wang, Y. and Kovscek, A. R. (2000) ‘Streamline approach for history matching production data’, *SPE Journal*, 5(4), pp. 353–361. doi: 10.2118/58350-pa.
51. Yan, W. *et al.* (2004) ‘Three-phase compositional streamline simulation and its application to WAG’, *Proceedings - SPE Symposium on Improved Oil Recovery*, 2004-April, pp. 1–11. doi: 10.2523/89440-ms.
52. Zhu, Z., Gerritsen, M. G. and Thiele, M. R. (2009) ‘Thermal streamline simulation for hot water flooding’, *SPE Reservoir Simulation Symposium Proceedings*, 2, pp. 1282–

1295. doi: 10.2118/119200-ms.

53. Zhu, Z., Thiele, M. R. and Gerritsen, M. G. (2011) 'Thermal streamline simulation: Steam floods', *Society of Petroleum Engineers - SPE Reservoir Simulation Symposium 2011*, 1, pp. 1–13. doi: 10.2118/139501-ms.

# IZJAVA

o samostalnoj izradi Diplomskog rada

Izjavljujem pod punom materijalnom i moralnom odgovornošću da sam ovaj rad izradio/la samostalno te da u njemu nema kopiranih ili prepisanih dijelova teksta tuđih radova, a da nisu propisano označeni kao citati s navedenim izvorom iz kojeg su preneseni.

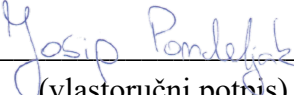
U Zagrebu, 10.01.2021.

---

JOSIP PONDELJAK

(ime i prezime tiskanim slovima)

---



(vlastoručni potpis)





KLASA: 602-04/20-01/229  
URBROJ: 251-70-03-20-2  
U Zagrebu, 12.01.2021.

**Josip Pondeljak, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM: 602-04/20-01/229, UR. BROJ: 251-70-12-20-1 od 29.10.2020. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

## SIMULACIJA STRUJNICA PROTJECANJA

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu izv. prof. dr. sc. Domagoj Vulin, izvanredni profesor Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

**Voditelj**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Domagoj Vulin

(titula, ime i prezime)

**Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Vladislav Brkić

(titula, ime i prezime)

**Prodekan za nastavu i  
studente**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek

(titula, ime i prezime)