

# Analiza utjecaja mjera zaštite od štetnog djelovanja morske vode u vodonosnicima pod tlakom

---

**Kunac, Ivona**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:947853>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-02**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ivona Kunac**

**Split, 2021.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Ivona Kunac**

**Analiza utjecaja mjera zaštite od štetnog djelovanja  
morske vode u vodonosnicima pod tlakom**

**Diplomski rad**

**Split,2021.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: Ivona Kunac

MATIČNI BROJ (JMBAG):0083217619

KATEDRA: **Katedra za hidrotehniku**

PREDMET: Obalno inženjerstvo

**ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema: Analiza utjecaja mjera zaštite od štetnog djelovanja morske vode u vodonosnicima pod tlakom

Opis zadatka: U sklopu zadatka potrebno je:

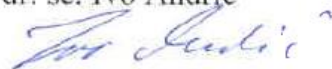
- Odabrati relevantan set laboratorijskih rezultata;
- Koristeći COMSOL Multiphysics razviti i kalibrirati model pronosa morske vode u obalni vodonosnik u lab uvjetima;
- Pregledom literature odabrati i predložiti tri mjere zaštite vodonosnika pod tlakom;
- Po kalibraciji, implementirati odabrane mjere u COMSOL okruženje;
- Ispitati utjecaj relevantnih parametara na svojstva klina slane vode u poroznom mediju;S Sistematizirati i kritički obraditi rezultate;
- Sugerirati najprikladniju mjeru zaštite.

U Splitu, 16.04.2021.

Voditelj **Diplomskog** rada:

Doc.dr.sc.  Veljko Srzic

Predsjednik Povjerenstva  
za završne i diplomske ispite:  
Doc. dr. sc. Ivo Andrić



# **Analiza utjecaja mjera zaštite od štetnog djelovanja morske vode u vodonosnicima pod tlakom**

## ***Sažetak:***

Izrađen je numerički model korištenjem softvera Comsol Multiphysics. U model su postavljene tri mjere zaštite u svrhu smanjenja prodora morske vode u zaobalje doline Neretve. Ispitani su parametri svake od mjera zaštite, dana je preporuka o prihvatljivosti i funkcionalnosti i definirani su projektni parametri za rješenje koje je odabrano kao najprikladnija mjera zaštite od djelovanja morske vode.

## ***Ključne riječi:***

numerički model, dolina Neretve, prodor morske vode, slani klin, vodonosnik, koncentracija soli, mjera zaštite

# **Analysis of the impact of protection measures against the harmful effect of seawater in pressurized aquifers**

## ***Abstract:***

Numerical model was developed using Comsol Multiphysics software. In order to reduce the penetration of seawater into the hinterland of the Neretva Valley three protection measures were set. The parameters of each of the protection measures were examined, a recommendation on acceptability and functionality was given and project parameters were defined for the most appropriate solution.

## ***Keywords:***

numerical model, Neretva Valley, seawater penetration, salt wedge, aquifer, salt concentration, protection measure

## **Zahvale**

*Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Veljku Srziću na pomoći u izradi diplomskog rada, prenesenom znanju, ustupanju materijala, strpljivosti i dostupnosti u svako vrijeme. Na početku izazov i sumnja u sâmu sebe, na kraju uspjeh i zadovoljstvo biti pod njegovim vodstvom.*

*Zahvalnost dugujem i roditeljima, posebno majci koja je uvijek imala razumijevanja, uvijek bila tu i molitvom ispratila svaki ispit.*

*Velika zahvalnost sestri Aniti na ljubavi i suosjećanju, na svim savjetima, kritikama i pohvalama, uz uvijek pravu riječ i poticaj da nastavim.*

*Hvala prijateljici i kolegici Ivani na društvu i pomoći kroz svaku etapu zajedničkog školovanja, i tešku i laku – od osnovnoškolske klupe do diplome.*

*Na kraju, posebno hvala Antonii, Matei i don Darku na svim zajedno proživljenim danima učenja, onim lijepim, kojih je bilo puno više, i onim manje lijepim, trenutcima strahova i padanja.*

*Antonia, moja pomoć u organizaciji i planiranju, uvijek je vjerovala u mene, bodrila me i tješila i hvala joj na tome. Matea, sa mnom u svemu i uvijek, s njom je sve bilo lakše i sve s osmijehom, a bez nje ništa! Neizmjereno hvala don Darku na molitvi, razumijevanju, nesebičnosti, potpori, ohrabrenju i vjeri da ću doći do cilja.*

*Još jednom hvala svakom članu moje obitelji, prijateljima i kolegama!*

*Najveće hvala dragom Bogu!*

*A ja, Bože sačuvaj da bih se ičim ponosio osim križem Gospodina našega Isusa Krista po kojem je meni svijet raspjet i ja svijetu.*

(Gal 6, 14)

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. CILJ RADA .....	2
3. LABORATORIJSKI EKSPERIMENT .....	3
3.1. Motivacija za laboratorijski model .....	3
3.2. Uvjeti u laboratoriju .....	3
3.2.1. Domena.....	3
3.2.2. Porozni medij.....	3
3.2.3. Hidraulička vodljivost.....	4
3.2.4. Početni uvjet.....	4
3.2.5. Rubni uvjeti za tečenje.....	5
3.2.6. Rubni uvjeti za transport.....	5
3.3. Rezultati laboratorijskog eksperimenta .....	5
3.4. Usporedba laboratorijskih i numeričkih rezultata.....	7
4. NUMERIČKI MODEL.....	10
4.1. Numeričke metode.....	10
4.2. COMSOL Multiphysics .....	10
4.2.1. Modeliranje pronosa mase i energije u prozrim medijima s modulom protoka poroznog medija (Porous Media Flow Module) .....	11
4.2.2. Modul podpovršinskog toka (Subsurface Flow Modul).....	11
5. NUMERIČKI MODEL-DETALJI .....	12
5.1. Diskretizacija .....	12
5.2. Domena.....	12
5.3. Parametri .....	12
5.3.1. Longitudinalna i transverzalna disperzija .....	13
6. REZULTATI NUMERIČKOG MODELA.....	14
6.1. Referentni setup modelskog rješenja.....	14
6.1.1. Početni uvjeti.....	14
6.1.2. Rubni uvjet zatečenje.....	14
6.1.3. Rubni uvjet za transport.....	15
6.1.4. Stacionarnost modela .....	15
6.2. Prodor klina soli – početno stanje bez uvođenja zaštite.....	16
6.3. Zdenac za crpljenje .....	19
6.3.1. Analiza utjecaja količine crpljenja $Q$ ( $m^3/s$ ) .....	20
6.3.2. Analiza dubine crpljenja $d$ (cm).....	22

6.3.3.	Analiza udaljenosti zdenca od ruba domene $\Delta x$ (cm) .....	24
6.3.4.	Analiza zajedničkog utjecaja udaljenosti i dubine na duljinu klina .....	27
6.4.	Kanal za navodnjavanje .....	28
6.4.1.	Analiza utjecaja razine vode u kanalu na smanjenje duljine klina .....	30
6.4.2.	Analiza utjecaja dubine kanala na smanjenje duljine klina.....	31
6.4.3.	Analiza udaljenosti kanala od ruba domene na duljinu klina.....	33
6.4.4.	Analiza zajedničkog utjecaja udaljenosti i dubine kanala na duljinu klina .....	35
6.5.	Injekcijska zavjesa .....	37
6.5.1.	Analiza utjecaja dubine injekcijske zavjese od površine na smanjenje klina.....	40
7.	RASPRAVA .....	42
7.1.	Valorizacija triju rješenja.....	42
8.	ZAKLJUČAK.....	44



## I. Popis slika

Slika 1. Hidraulički konduktivitet za različite hidrauličke gradijente (izvor: <a href="https://agu2020fallmeeting-agu.ipostersessions.com/default.aspx?s=9F-8D-D5-96-76-6C-C9-29-F3-01-BF-16-68-9A-01-4A&amp;guestview=true">https://agu2020fallmeeting-agu.ipostersessions.com/default.aspx?s=9F-8D-D5-96-76-6C-C9-29-F3-01-BF-16-68-9A-01-4A&amp;guestview=true</a> ) .....	4
Slika 2. Snimak laboratorijskog eksperimenta koji odgovara trajanju $t = 15$ min .....	5
Slika 3. Snimak laboratorijskog eksperimenta koji odgovara trajanju $t = 30$ min .....	6
Slika 4. Snimak laboratorijskog eksperimenta koji odgovara trajanju $t = 60$ min .....	6
Slika 5. Snimak laboratorijskog eksperimenta koji odgovara trajanju $t = 120$ min .....	6
Slika 6. Usporedba laboratorijskog i numeričkog rješenja za vrijeme trajanja $t = 15$ min.....	8
Slika 7. Usporedba laboratorijskog i numeričkog rješenja za vrijeme trajanja $t = 30$ min.....	8
Slika 8. Usporedba laboratorijskog i numeričkog rješenja za vrijeme trajanja $t = 60$ min.....	9
Slika 9. Usporedba laboratorijskog i numeričkog rješenja za vrijeme trajanja $t = 120$ min.....	9
Slika 10. Mreža konačnih elemenata xy smjer .....	12
Slika 11. Početno stanje $C = 0$ mol/m <sup>3</sup> .....	14
Slika 12. Grafički prikaz stacionarnosti modela koje odgovara trajanju simulacije od $t = 1300$ min ...	15
Slika 13. Snimak stacionarnog tlaka koje odgovara trajanju simulacije od $t = 1300$ min.....	16
Slika 14. Prikaz legende za koncentraciju $c$ mol/m <sup>3</sup> .....	16
Slika 15. Snimak numerički zadane simulacije prodora slane vode koje odgovara trajanju $t = 15$ min	16
Slika 16. Snimak numerički zadane simulacije prodora slane vode koje odgovara trajanju $t = 30$ min	17
Slika 17. Snimak numerički zadane simulacije prodora slane vode koje odgovara trajanju $t = 60$ min	17
Slika 18. Snimak numerički zadane simulacije prodora slane vode koje odgovara trajanju $t = 120$ min .....	17
Slika 19. Snimak numerički zadane simulacije prodora slane vode koje odgovara trajanju $t = 480$ min .....	18
Slika 20. Snimak numerički zadane simulacije prodora slane vode koje odgovara trajanju $t = 1000$ min .....	18
Slika 21. 3D prikaz geometrije zdenca za crpljenje .....	20
Slika 22. Količina crpljenja $Q = 3.927 \cdot 10^{-7}$ m <sup>3</sup> /s za vrijeme trajanja $t = 1000$ min .....	21
Slika 23. Količina crpljenja $Q = 7.854 \cdot 10^{-7}$ m <sup>3</sup> /s za vrijeme trajanja $t = 1000$ min .....	21
Slika 24. Količina crpljenja $Q = 1.5708 \cdot 10^{-6}$ m <sup>3</sup> /s za vrijeme trajanja $t = 1000$ min .....	21
Slika 25. Grafički prikaz ovisnosti promjene količine crpljenja na duljinu klina .....	22
Slika 26. Dubina crpljenja $d = 20$ cm za vrijeme trajanja $t = 1000$ min.....	23
Slika 27. Dubina crpljenja $d = 25$ cm za vrijeme trajanja $t = 1000$ min.....	23
Slika 28. Dubina crpljenja $d = 30$ cm za vrijeme trajanja $t = 1000$ min.....	23
Slika 29. Dubina crpljenja $d = 35$ cm za vrijeme trajanja $t = 1000$ min.....	24
Slika 30. Grafički prikaz ovisnosti promjene dubine crpljenja na duljinu klina .....	24
Slika 31. Udaljenost zdenca od ruba domene $\Delta x = 10$ cm za vrijeme trajanja $t = 1000$ min.....	25
Slika 32. Udaljenost zdenca od ruba domene $\Delta x = 20$ cm za vrijeme trajanja $t = 1000$ min.....	25
Slika 33. Udaljenost zdenca od ruba domene $\Delta x = 30$ cm za vrijeme trajanja $t = 1000$ min.....	25
Slika 34. Udaljenost zdenca od ruba domene $\Delta x = 40$ cm za vrijeme trajanja $t = 1000$ min.....	26
Slika 35. Udaljenost zdenca od ruba domene $\Delta x = 50$ cm za vrijeme trajanja $t = 1000$ min.....	26
Slika 36. Grafički prikaz ovisnosti promjene udaljenosti zdenca na duljinu klina .....	26
Slika 37. Grafički prikaz ovisnosti dubine crpljenja i udaljenosti zdenca na duljinu klina.....	27
Slika 38. Grafički prikaz ovisnosti brzine crpljenja i udaljenosti zdenca na duljinu klina.....	28
Slika 39. 3D prikaz geometrije kanala za navodnjavanje.....	29

Slika 40. Razina vode u kanalu $h = 41$ cm za vrijeme trajanja $t = 600$ min .....	30
Slika 41. Razina vode u kanalu $h = 41.5$ cm za vrijeme trajanja $t = 600$ min .....	30
Slika 42. Razina vode u kanalu $h = 42$ cm za vrijeme trajanja $t = 600$ min .....	31
Slika 43. Grafički prikaz ovisnosti dubine vode u kanalu na duljinu klin.....	31
Slika 44. Dubina kanala $d = 2$ cm za vrijeme trajanja $t = 600$ min .....	32
Slika 45. Dubina kanala $d = 4$ cm za vrijeme trajanja $t = 600$ min .....	32
Slika 46. Dubina kanala $d = 6$ cm za vrijeme trajanja $t = 600$ min .....	32
Slika 47. Dubina kanala $d = 8$ cm za vrijeme trajanja $t = 600$ min .....	33
Slika 48. Grafički prikaz ovisnosti dubine kanala na duljinu klina .....	33
Slika 49. Udaljenost kanala od ruba domene $\Delta x = 10$ cm za vrijeme trajanja $t = 600$ min.....	34
Slika 50. Udaljenost kanala od ruba domene $\Delta x = 20$ cm za vrijeme trajanja $t = 600$ min.....	34
Slika 51. Udaljenost kanala od ruba domene $\Delta x = 30$ cm za vrijeme trajanja $t = 600$ min.....	35
Slika 52. Udaljenost kanala od ruba domene $\Delta x = 40$ cm za vrijeme trajanja $t = 600$ min.....	35
Slika 53. Udaljenost kanala od ruba domene $\Delta x = 50$ cm za vrijeme trajanja $t = 600$ min.....	35
Slika 54. Grafički prikaz ovisnosti dubine kanala i udaljenosti kanala na duljinu klina.....	36
Slika 55. Stacionarnost simulacije injekcijske zavjese na dubini 30 cm od površine .....	38
Slika 56. 3D prikaz geometrije injekcijske zavjese.....	39
Slika 57. Dubina injekcijske zavjese od površine $d = 10$ cm za vrijeme trajanja $t = 2000$ min .....	40
Slika 58. Dubina injekcijske zavjese od površine $d = 15$ cm za vrijeme trajanja $t = 2000$ min .....	40
Slika 59. Dubina injekcijske zavjese od površine $d = 20$ cm za vrijeme trajanja $t = 2000$ min .....	40
Slika 60. Dubina injekcijske zavjese od površine $d = 25$ cm za vrijeme trajanja $t = 2000$ min .....	41
Slika 61. Dubina injekcijske zavjese od površine $d = 30$ cm za vrijeme trajanja $t = 2000$ min .....	41
Slika 62. Grafički prikaz ovisnosti dubine injekcijske zavjese na duljinu klina .....	41

## II. Popis simbola

$c$	koncentracija soli	$mol/m^3$
$\rho$	gustoća	$kg/m^3$
$\varepsilon$	poroznost	
$K$	hidraulička provodljivost	$m/s$
$g$	gravitacija	$m/s^2$
$D_c$	difuzija	$m/s^2$
$\alpha_L$	longitudinalna disperzija	$m$
$\alpha_T$	transverzalna disperzija	$m$
$\Delta t$	vremenski korak	$min$
$t$	vrijeme trajanja simulacije	$min$
$\Delta x$	udaljenost od lijevog ruba domene	$cm$
$x$	duljina klina u x smjeru	$m$
$v$	brzina	$m/s$
$Q$	količina crpljenja	$m^3/s$
$d_Z$	dubina zdenca od površine	$cm$
$d_K$	dubina kanala od površine	$cm$
$d_{inj.zav}$	Dubina injekcijske zavjese	$cm$
$\check{s}$	širina kanala	$cm$
$r$	radijus zdenca	$m$
$A$	površina poprečnog presjeka zdenca	$m^2$

## 1. UVOD

Zaslanjenje rijeke Neretve događa se u dva glavna smjera, a to su kroz korito rijeke Neretve i kroz podzemlje [1]. Uslojeno tečenje javlja se na ušćima priobalnih rijeka gdje sloj slatke vode teče prema ušću iznad sloja morske vode [1]. Prodor slane vode je kretanje slane vode u slatkovodne vodonosnike što može dovesti do onečišćenja izvora pitke vode. Sol je najčešći zagađivač svježeg podzemne vode koje utječu na mnoge vodonosnike. Kada je jednom započeo prodor slane vode i nastavljeno navodnjavanje usjeva slanom vodom to rezultira nakupljanjem soli u tlu koja se ne eliminira pri novom punjenju vodonosnika. Najznačajnije prodiranje morske vode u Neretvu uočava se u ljetnim mjesecima u dugom razdoblju bez padalina kada je protok najmanji što rezultira smanjenom poljoprivrednom proizvodnjom [1]. Ovaj problem usvojen kao dominantno negativan od velike je važnosti za cijelu Neretvansku dolinu koja je jedno od najvažnijih poljoprivrednih područja u Republici Hrvatskoj. U ovom radu opisan je numerički model uslojenog tečenja dvaju fluida različite gustoće i moguće mjere zaštite kako bi se došlo do što boljih rješenja kako potisnuti slani klin prema ušću.

Miješanje slatke i slane vode događa se samo u vertikalnom smjeru advekcijom slane vode u gornji sloj. To miješanje nije značajno pa je tranzicijska zona između dva sloja vrlo uska i može se usvojiti oštra granica koja je osim razdjelnica slatke i slane vode tj. haloklina (nagla promjena saliniteta) ujedno i piknolina (nagla promjena gustoće po dubini) i termoklina (izrazita promjena temperature) [2].

Izrađen je numerički model u softverskom programu COMSOL Multiphysics koji predstavlja idealizirani vodonosnik u kojem je materijal ujednačen. U numeričkom modelu analizirana su tri moguća rješenja problema zaslanjenja. Prvo rješenje je postavljanje zdenca za crpljenje. Zdenac za crpljenje postavljen na određenoj udaljenosti i dubini, određenom količinom crpi vodu iz vodonosnika, kako zdenac crpi vodu tako zahvaća slani klin i izbacuje slanu vodu prema van, smanjuje duljinu slanog klina i poboljšava uvjete za navodnjavanje. Kao drugo rješenje odabran je kanal za infiltraciju slatke vode u vodonosnik. Kanal je pod tlakom i postavljen širinom cijele domene. Analiziran je utjecaj udaljenosti kanala, dubine kanala i razine vode u kanalu na duljinu slanog klina. Treća mjera za smanjenje prodora slanog klina koja se u radu analizira je postavljanje injekcijske zavjese neposredno iza ulaza morske vode u vodonosnik. Postavlja se na različitoj dubini od površine i promatra utjecaj na smanjenje klina. Rad se sastoji u valorizaciji tih triju rješenja, preporukama i zaključcima i odabiru projektnih parametara za najbolje rješenje.

## **2. CILJ RADA**

Cilj rada je izbor najboljeg rješenja za smanjenje prodora slane vode u vodonosnik pomoću:

- izrade numeričkog modela kroz softver Comsol Multiphysics u kojem se simulira vodonosnik pod tlakom koji opisuje intruziju morske vode u zaobalje doline Neretve
- postavljanja tri mjere zaštite prodora slanog klina - zdenac za crpljenje, kanal za navodnjavanje i injekcijska zavjesa
- analize utjecaja svake od tri mjere zaštite na duljinu prodora slanog klina
- ispitivanja parametara svake od tri mjere s ciljem detekcije najfunkcionalnije
- izrade preporuka o prihvatljivosti, težini izvodljivosti i financijskoj isplativosti

I na kraju definirane projektnih parametara za rješenje koje se usvoji kao najbolje.

### 3. LABORATORIJSKI EKSPERIMENT

#### 3.1. Motivacija za laboratorijski model

U sljedećem poglavlju pokazana je sposobnost laboratorijski razvijenog modela da oponaša prodor slane vode u obalni vodonosnik.

- Zašto je odabran laboratorijski model? Zbog toga što bolje opisuje fiziku i procese od numeričkog modela.
- Kako? Tako što u softveru korisnik zadaje fizikalne veličine, a u laboratoriju su onakve kakve zapravo jesu u stvarnim uvjetima.

Usporedba laboratorijskog modela i Comsol modela dana je kao demonstracija da Comsol ima kapacitet opisati fizikalni problem dovoljno dobro kao i u laboratorijskom eksperimentu.

U konačnici Comsol daje vremensku uštedu rješavanja problema kojim se rad bavi.

#### 3.2. Uvjeti u laboratoriju

##### 3.2.1. Domena

Eksperimentalni rezultati rađeni su u laboratoriju gdje je postavljena čelično-staklena posuda ukupne duljine 3 m, visine 0.65 m i debljine 0.125 m. Unutarnja domena podijeljena je u 3 komore:

- Srednja komora koja oponaša vodonosnik poroznog medija (duljina 1.88 m)
- Lijeva komora koja služi kao rubni uvjet slane vode (duljina 0.75 m)
- Desna komora koja oponaša slatkovodni uzvodni rezervoar (duljina 0.7 m)

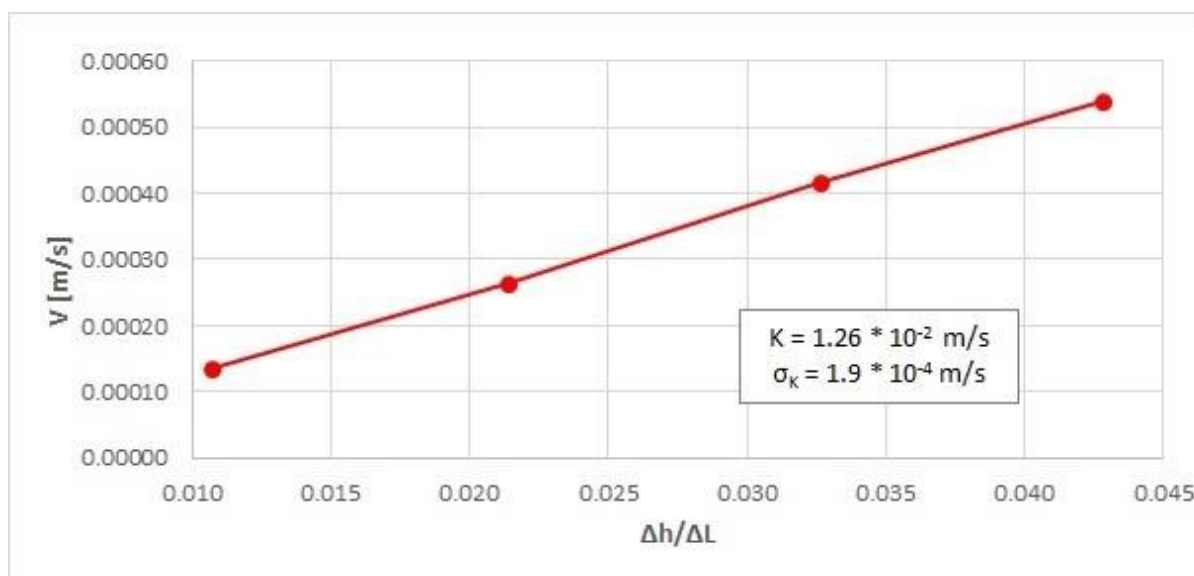
##### 3.2.2. Porozni medij

Sa lijeve strane domene nalazi se spremnik sa slanom vodom tj. crvenom bojom koja oponaša sol. Tekućina crvene boje E124 uzeta je kao relevantna boja koja daje najbolju topljivost, stabilnost i vidljivost. Za oponašanje materijala vodonosnika unutar laboratorijskog toka za provođenje odabrane su SiLi staklene perle tipa S s intervalom promjera 1-1.3 mm.

Istovremeno rade dvije crpke, jedna puni komoru slane vode crvenom bojom iz vanjskog spremnika dok druga pumpa omogućuje recirkulaciju zasićene otopine iz komore slane vode u vanjski spremnik.

### 3.2.3. Hidraulička vodljivost

Za određivanje hidrauličke vodljivosti primijenjen je Darcyjev zakon. Odabrano je nekoliko različitih hidrauličkih gradijenata, za koje je izmjeren protok za fiksno vremensko razdoblje. Za određeni poznati presjek i zadani gradijent, hidraulička vodljivost je određena primjenom Darcyjevog zakona. [3].



Slika 1. Hidraulički konduktivitet za različite hidrauličke gradijente (izvor: <https://agu2020fallmeeting-agu.ipostersessions.com/default.aspx?s=9F-8D-D5-96-76-6C-C9-29-F3-01-BF-16-68-9A-01-4A&guestview=true>)

### 3.2.4. Početni uvjet

Početni uvjet postavljen je u trenutku 0 C ( $x,y;t = 0$ ) = 0.0 g/l, kako bi se to osiguralo postavljena su vrata unutar komore sa slanom vodom.

### 3.2.5. Rubni uvjeti za tečenje

Uzvodni i nizvodni rubni uvjeti postavljeni su tako da je razina vodnog stupca konstantna što je osigurano postavljanjem i korištenjem preljeva i iznosi na nizvodnom rubnom uvjetu 41 cm od dna domene, a na uzvodnom 42 cm.

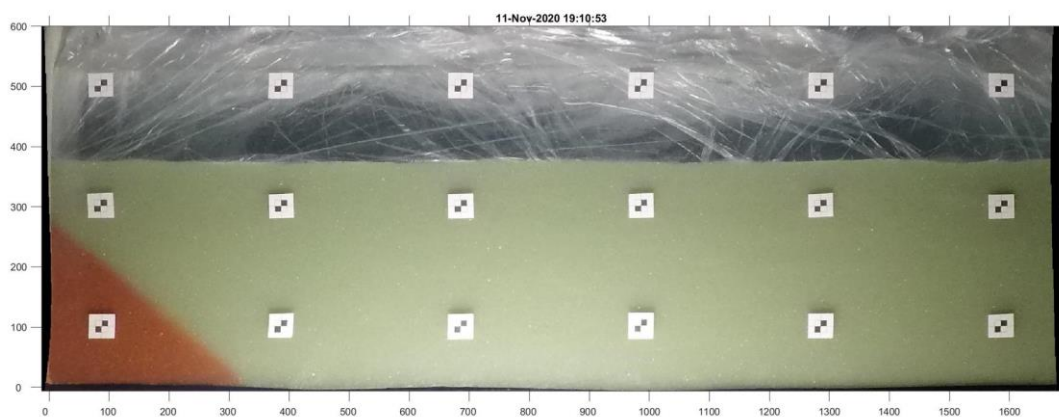
Na vrhu domene kao gornji rubni uvjet postavljena je PE folija kako bi se osiguralo zatvaranje vodonosnika i stanje pod tlakom bez protoka. Folija je postavljena na vrh i na njoj 16 cm stupca slatke vode čime se ostvaruje učinak prijanjanja na staklene ploče. Dno posude je također bez protoka.

### 3.2.6. Rubni uvjeti za transport

Granični uvjet prema moru odabran je kao granica morske vode s koncentracijom  $C = 1 \text{ mol/m}^3$ , dok je na uzvodnom rubu predviđena slatka voda s koncentracijom  $C = 0 \text{ mol/m}^3$ .

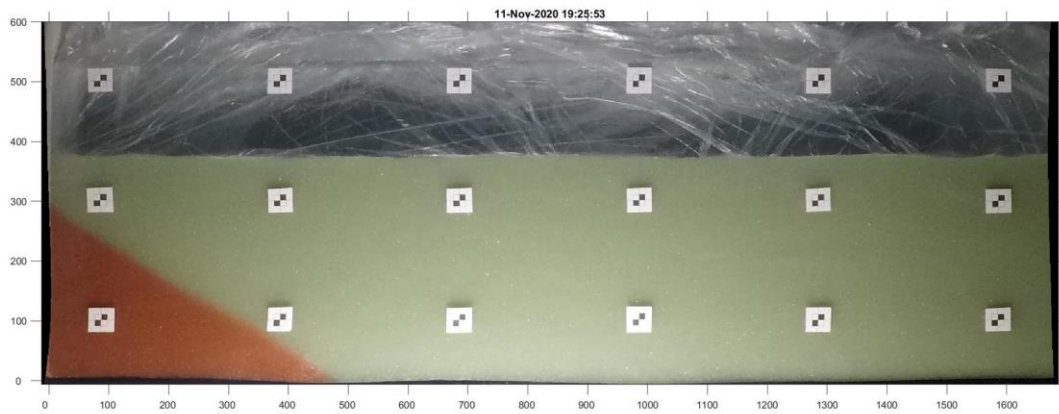
## 3.3. Rezultati laboratorijskog eksperimenta

Rezultati prema gore opisanim uvjetima u laboratoriju za ukupno vrijeme provedeni su i prikazani za ukupno  $t = 120 \text{ min}$ . U nastavku su prikazani rezultati za  $t = 15; 30; 60$  i  $120 \text{ min}$ .

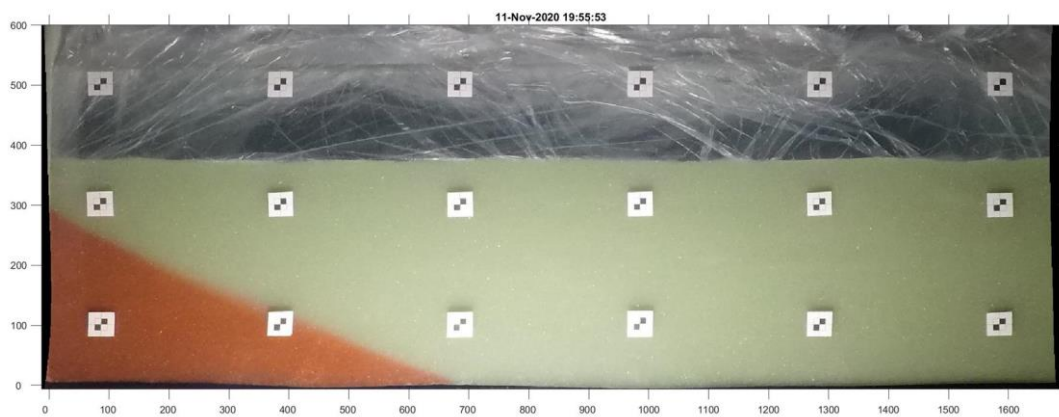


Slika 2. Snimak laboratorijskog eksperimenta koji odgovara trajanju  $t = 15 \text{ min}$

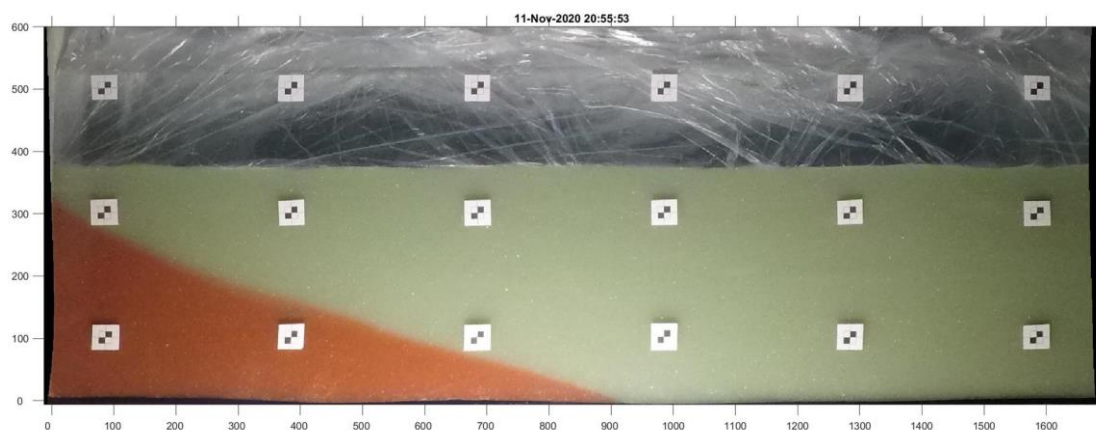




Slika 3. Snimak laboratorijskog eksperimenta koji odgovara trajanju  $t = 30$  min



Slika 4. Snimak laboratorijskog eksperimenta koji odgovara trajanju  $t = 60$  min



Slika 5. Snimak laboratorijskog eksperimenta koji odgovara trajanju  $t = 120$  min

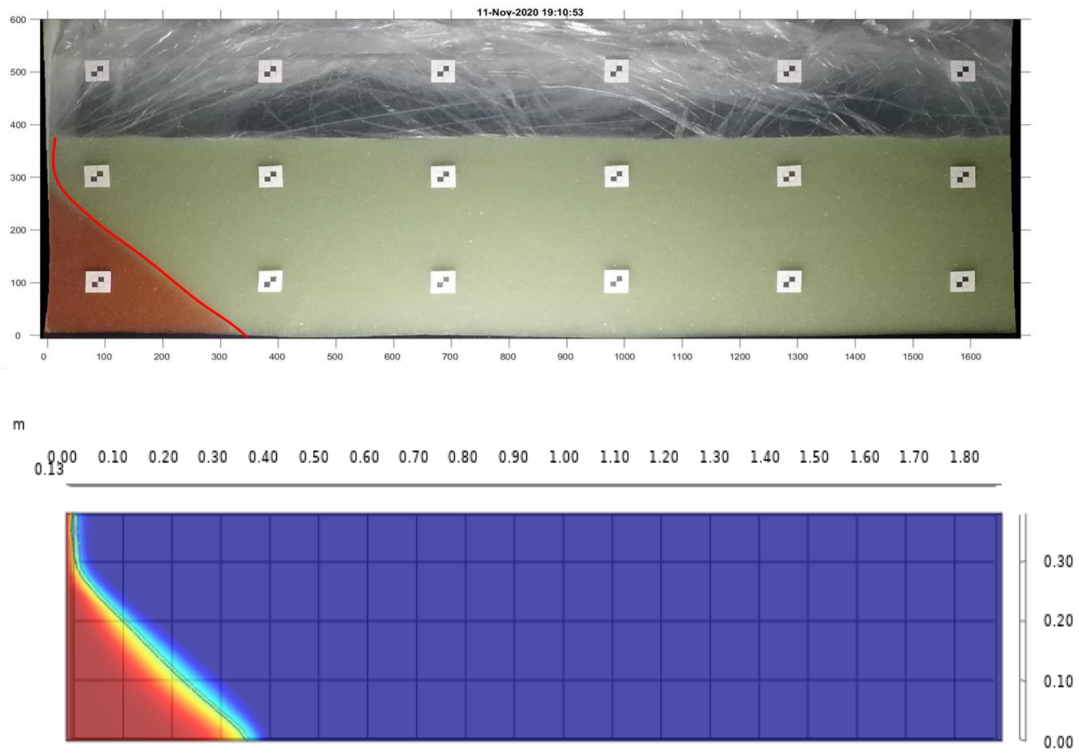
### 3.4. Usporedba laboratorijskih i numeričkih rezultata

Da bi numerički model kapacitativno bio prikladan simulaciji procesa potrebno je usporediti odgovara li model koji je pokrenut prema zadanim vrijednostima stvarnom stanju tj. stanju u laboratoriju koje odgovara stanju u prirodi. U poglavlju 3.1 i 3.2. opisani su uvjeti u laboratoriju i prikazana rješenja. Za potrebe usporedbe izrađen je model sa parametrima koji odgovaraju onim u laboratoriju, a za nešto se razlikuju od onih koji su korišteni prethodno u ovom radu.

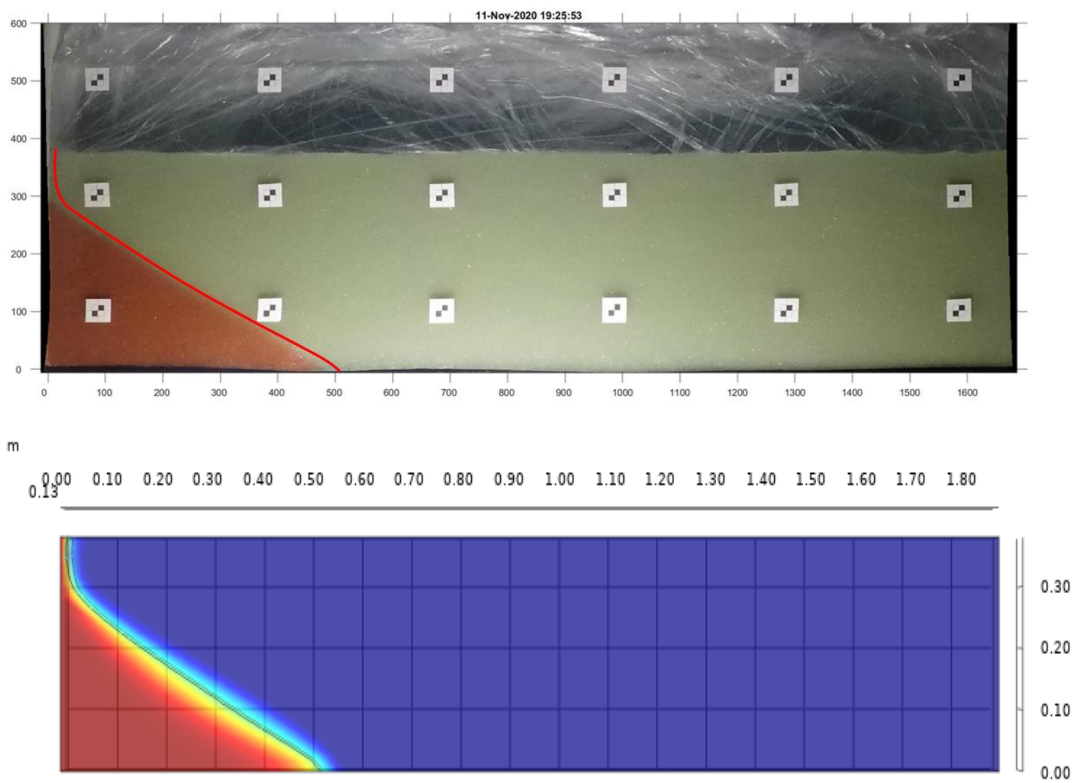
Parametri numeričkog modela i modela u laboratoriju:

- Geometrija bloka/posude  $1.88 \times 0.38 \times 0.125$
- Poroznost materijala  $\varepsilon = 0.38$
- Lijevi rubni uvjet  $h = 41$  cm
- Desni rubni uvjet  $h = 42$  cm
- Vrijeme trajanja  $t = 120$  min

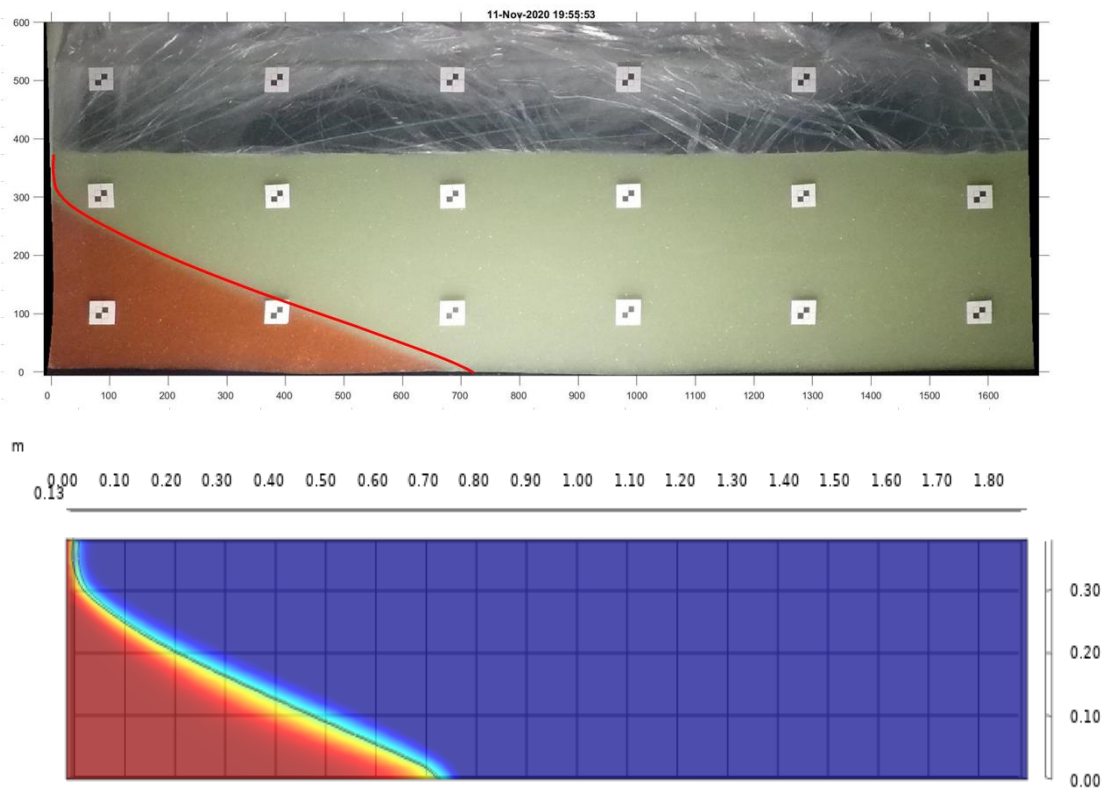
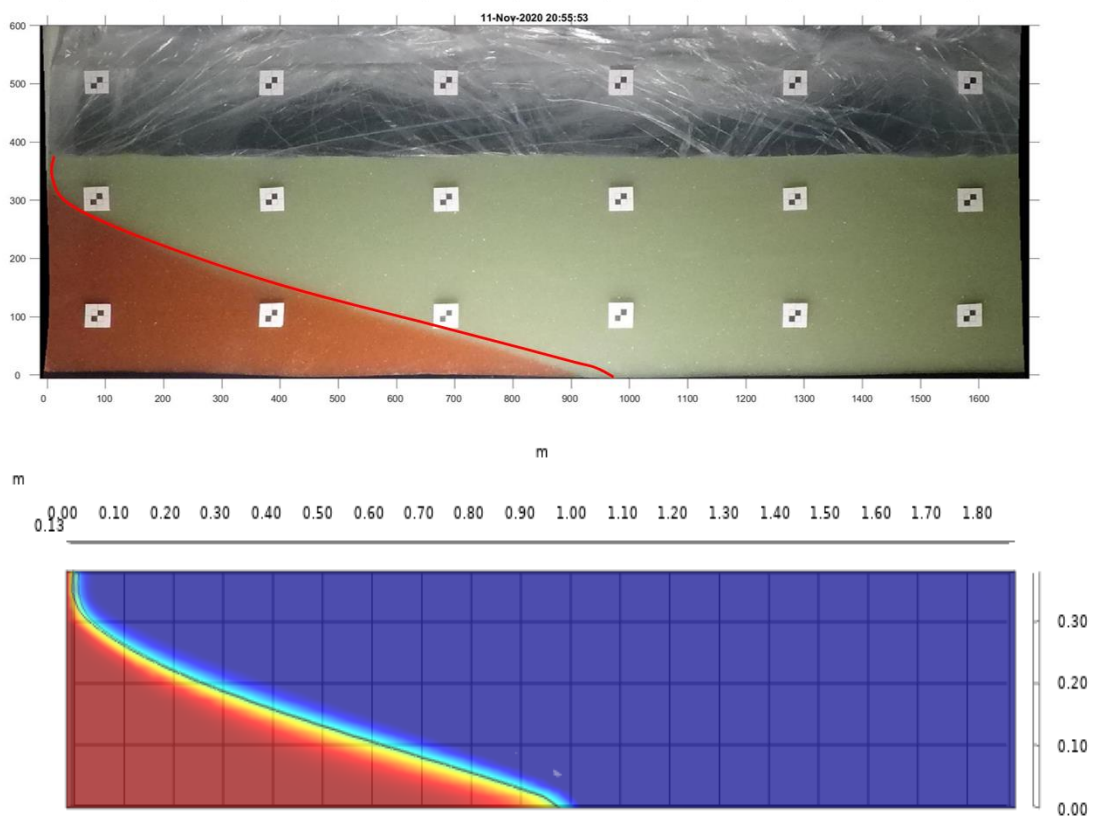
Na slikama laboratorijskog eksperimenta označena je linija 50 % koncentracije iz Comsola radi usporedbe rezultata. Vidljivo je da nema većeg odstupanja u rezultatima, duljina klina za očitano vrijeme približno je jednaka što dokazuje da numerički model vrlo dobro opisuje laboratorijske rezultate tj. stvarno stanje u vodonosniku i da se može njime koristiti u svrhu rješavanja problema.



Slika 6. Usporedba laboratorijskog i numeričkog rješenja za vrijeme trajanja  $t=15$  min



Slika 7. Usporedba laboratorijskog i numeričkog rješenja za vrijeme trajanja  $t=30$  min

Slika 8. Usporedba laboratorijskog i numeričkog rješenja za vrijeme trajanja  $t = 60$  minSlika 9. Usporedba laboratorijskog i numeričkog rješenja za vrijeme trajanja  $t = 120$  min

## 4. NUMERIČKI MODEL

### 4.1. Numeričke metode

Problemi ovisni o prostoru i vremenu izražavaju se pomoću parcijalnih diferencijalnih jednačbi (PDJ). Za veliku većinu geometrija te parcijalno diferencijalne jednačbe ne mogu se riješiti analitičkim metodama. Umjesto toga može se napraviti aproksimacija jednačbi pomoću različitih metoda diskretizacija. Metode diskretizacije približavaju PDJ numeričkim modelima jednačbi koje se mogu riješiti pomoću numeričkih metoda. Rješenje jednačbi numeričkog modela je aproksimacija stvarnog rješenja PDJ. Za proračun takvih aproksimacija koristi se metoda konačnih elemenata (MKE).

Prednost korištenja metode konačnih elemenata je ta što nudi veliku slobodu u izboru diskretizacije, kako u elementima koji se mogu koristiti za diskretizaciju prostora, tako i u bazičnim funkcijama.

Također, prednost metode konačnih elemenata je dobro razvijena teorija. Razlog tome je bliska veza između numeričke formulacije i slabe formulacije problema PDJ. Teorija daje korisnu procjenu pogrešaka ili granicu za pogrešku kada se jednačbe numeričkog modela rješavaju na računalu.

### 4.2. COMSOL Multiphysics

Comsol je softver za simulaciju širokog spektra aplikacija, ali prilagođen svim korisnicima za upotrebu. Dizajniran je tako da pruža najtočnije rezultate minimiziranjem pretpostavki koje korisnici trebaju napraviti. Korisnici Comsola oslobođeni su restriktivne prirode povezane sa simulacijskim softverom. Za razliku od drugih softvera Comsol omogućuje korisnicima da budu kreativni u smislu povezivanja neograničenog broja fizikalnih procesa i unosa korisnički definiranih fizikalnih procesa i izraza izravno u model. Neki od fizikalnih modela su akustika, elektromagnetika, kemijske reakcije, protok tekućine i prijenos topline. Comsol nastoji postići simulaciju koja oponaša sve ove učinke koji se opažaju u stvarnosti što je moguće bliže. To se postiže u sučelju programa koje je jednostavno za korištenje i usmjereno prema tome da znanstvenike i inženjere učini produktivnijim u svakodnevnom radu [4].

#### **4.2.1. Modeliranje pronosa mase i energije u prozrim medijima s modulom protoka poroznog medija (Porous Media Flow Module)**

Poljoprivredni, kemijski i nuklearni inženjeri i znanstvenici koriste i simuliraju različite vrste procesa u poroznim medijima zbog čega modul protoka poroznog medija pruža opsežan skup alata za modeliranje na tom području. Ti alati su postavljeni na sučelje programa i automatski postavljaju i rješavaju jednadžbe specifične za vrstu procesa koji se modelira.

Modul protoka poroznog medija je dodatak softveru Comsol kojim se mogu modelirati transportne pojave u poroznim medijima koristeći Darcyjev zakon, uključujući promjenjivo zasićeni protok poroznih medija. Napredniji modeli mogu uključivati brzi protok s Brinkmanovim jednadžbama, višefazni transport, prijelomni tok ili protok gdje Darcyjev zakon ne vrijedi. Za najtočnije i najrealnije modele, multifizičke sposobnosti modela uključuju anizotermne tokove u poroznim medijima, učinkovita svojstva za višekomponentne sustave, poroelastičnost i transport vlage i kemijskih tvari [4].

#### **4.2.2. Modul podpovršinskog toka (Subsurface Flow Modul)**

Modul podpovršinskog toka za glavnu sposobnost ima modeliranje protoka u promjenjivo zasićenim i potpuno zasićenim poroznim medijima. Sučelje u programu je postavljeno pomoću izraza za tlak i visine vodnog stupca koji su poznati inženjeru koji modelira.

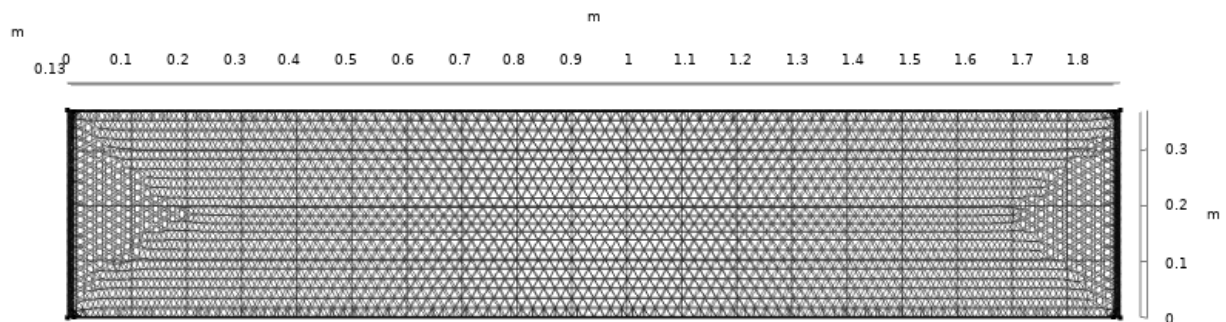
Za modeliranje protoka u promjenjivo zasićenim medijima gdje se hidraulička svojstva mijenjaju dok se tekućina kreće kroz medij i neke pore ispunjava neke isušava koristi se Ricardsova jednadžba. Ako se uzme u obzir zadržavanje u porama u promjenjivo zasićenim medijima mogu se koristiti van Geuchtenove, Brooksove i Coreyjeve formulacije. U sučelju se mogu regulirati gustoća, dinamička viskoznost, hidraulička vodljivost i dr.

Kod zasićenog protoka poroznog medija može se modelirati Darcyjevim zakonom što je slučaj koji je korišten u ovom radu ili Brinkmanovim proširenjem Darcyjevog zakona ovisno o veličini pora. Ako su pore takve da se viskozni učinci na protok fluida mogu zanemariti tada se može koristiti Darcyjev zakon i protok se u tom slučaju opisuje isključivo varijablom tlaka. U slučaju kada su pore velike toliko da mogu utjecati na protok tekućine tada se primjenjuju Brinkmanove jednadžbe [4].

## 5. NUMERIČKI MODEL-DETALJI

### 5.1. Diskretizacija

Geometrija je podijeljena na ukupno 177 974 elementa. Maksimalna veličina elementa je ručno postavljena na 0.02 m, a minimalna  $3.76 \cdot 10^{-4}$  m.



Slika 10. Mreža konačnih elemenata xy smjer

### 5.2. Domena

Domena modela približno odgovara laboratorijskim postavkama. Postavljen je blok duljine 1.88 m, visine 0.37 m i širine 0.125 m.

Geometrija je podijeljena na rešetke veličine  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.1$  m

### 5.3. Parametri

Zadani parametri:

- Gustoća materijala zadana je jednadžbom:

$$\rho = 1000 \cdot (1 - c) + 1025 \cdot c$$

- Gustoća mora  $\rho = 1025$  (kg/m<sup>3</sup>)

- Gustoća slatke vode  $\rho = 988.5$  (kg/m<sup>3</sup>)

- Poroznost:

$$\varepsilon = 0.37$$

- Hidraulička provodljivost:

$$K = 1.21 \cdot 10^{-2} \text{ (m/s)}$$

- Gravitacija:

$$g = 9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

- Difuzija:

$$D_c = 1 \cdot 10^{-9} \text{ (m/s}^2\text{)}$$

- Disperzija:

- Longitudinalna disperzija  $\alpha_L = 0.01 \text{ (m)}$

- Transverzalna disperzija  $\alpha_T = 0.001 \text{ (m)}$

### 5.3.1. Longitudinalna i transverzalna disperzija

Advekcija i molekularna difuzija su procesi koji generiraju tok mase soli iz područja veće koncentracije u područje manje koncentracije što znači da bi se u slučaju beskonačnog vremena postiglo potpuno miješanje i koncentracija u domeni  $c = 0.5 \text{ (mol/m}^3\text{)}$ . U problemu zaslanjenja koji se ovdje analizira molekularna difuzija je jako spor proces tako da je njen utjecaj zanemariv. Za razliku od advekcije i molekularne difuzije disperzija je posljedica numerike. Odnos longitudinalne i transverzalne disperzije optimalno je otprilike 1:10 što je i odabrano, longitudinalna disperzija  $\alpha_L = 0.01 \text{ (m)}$  i transverzalna  $\alpha_T = 0.001 \text{ (m)}$ . Longitudinalna i transverzalna disperzija važni su parametri za predviđanje debljine tranzicijske zone. Što je disperzija veća, šira je tranzicijska zona i veća diskretizacija da ne bi došlo do pucanja modela kod proračuna. Analogno ako se disperzija smanji treba biti gušća diskretizacija.



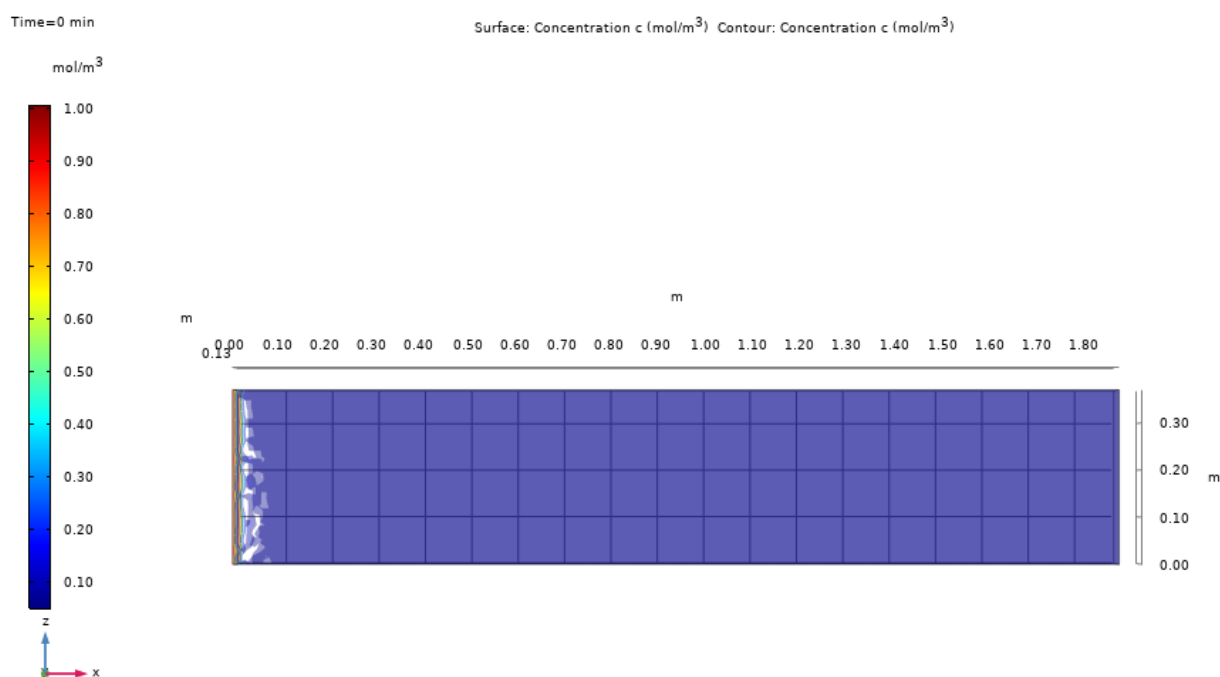
## 6. REZULTATI NUMERIČKOG MODELA

### 6.1. Referentni setup modelskog rješenja

Polazne simulacije ( $\Delta t = 5$  min) provedene su kako bi se istražilo napredovanje klina soli, kroz analiziranje učinaka ispumpavanja (zdenac za crpljenje), kanala za infiltraciju slatke vode i injekcijske zavjese uz mijenjanje parametara.

#### 6.1.1. Početni uvjeti

Početni uvjet modela je stacionarni tlak i uvjet bez tečenja na svim rubovima domene (gore, dolje, lijevo, desno). Vodostaj je na 40 cm od donjeg ruba domene. Unutar domene početni uvjet za transport je zadan kao  $C = 0$  mol/m<sup>3</sup> na cijeloj domeni.



Slika 11. Početno stanje  $C = 0$  mol/m<sup>3</sup>

#### 6.1.2. Rubni uvjet zatečenje

Rubni uvjet za tečenje uzvodno i nizvodno opisan kao hidrostatički tlak kontroliran je i razina vodnog stupca održavana konstantnom. Na nizvodnoj strani vodostaj je 40 cm od

dna domene, a na uzvodnoj 41 cm od dna domene. Po cijelom oplošju domene nema protoka.

### 6.1.3. Rubni uvjet za transport

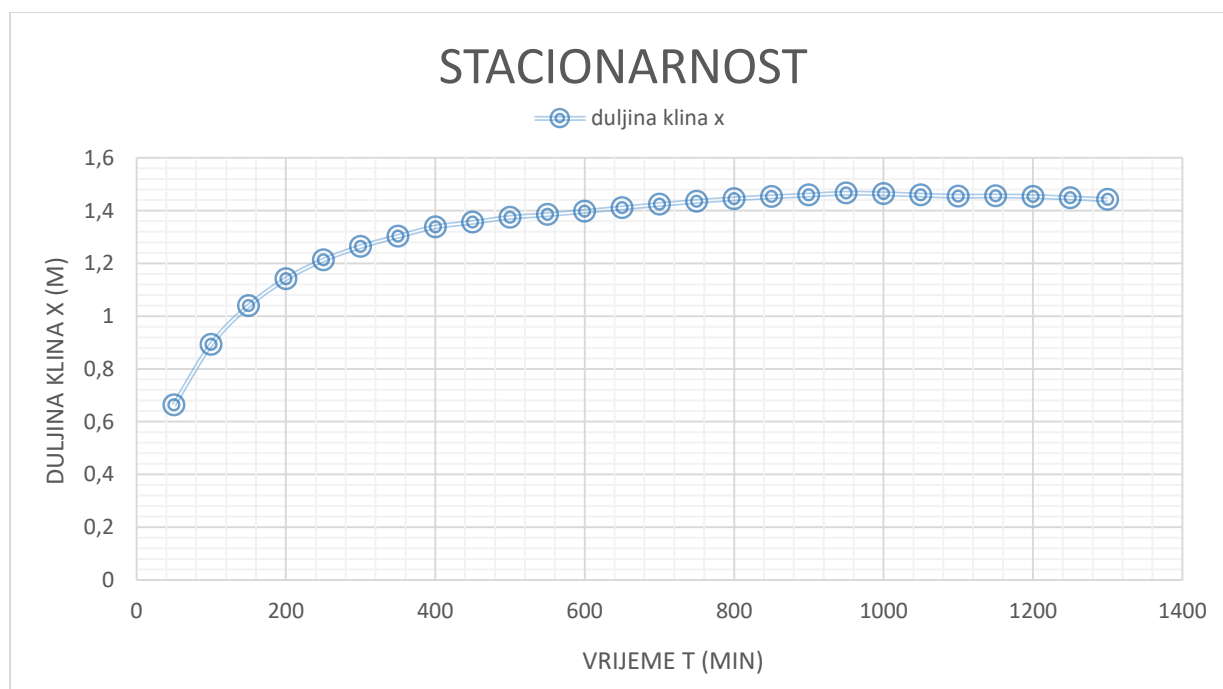
Rubni uvjet za transport zadan je na nizvodnoj strani  $C = 1 \text{ mol/m}^3$  (slana voda) i na uzvodnoj  $C = 0 \text{ mol/m}^3$  (slatka voda). Nema protoka po oplošju.

Ostali parametri korišteni u modelu zadani su gore u tekstu (5.3. Parametri).

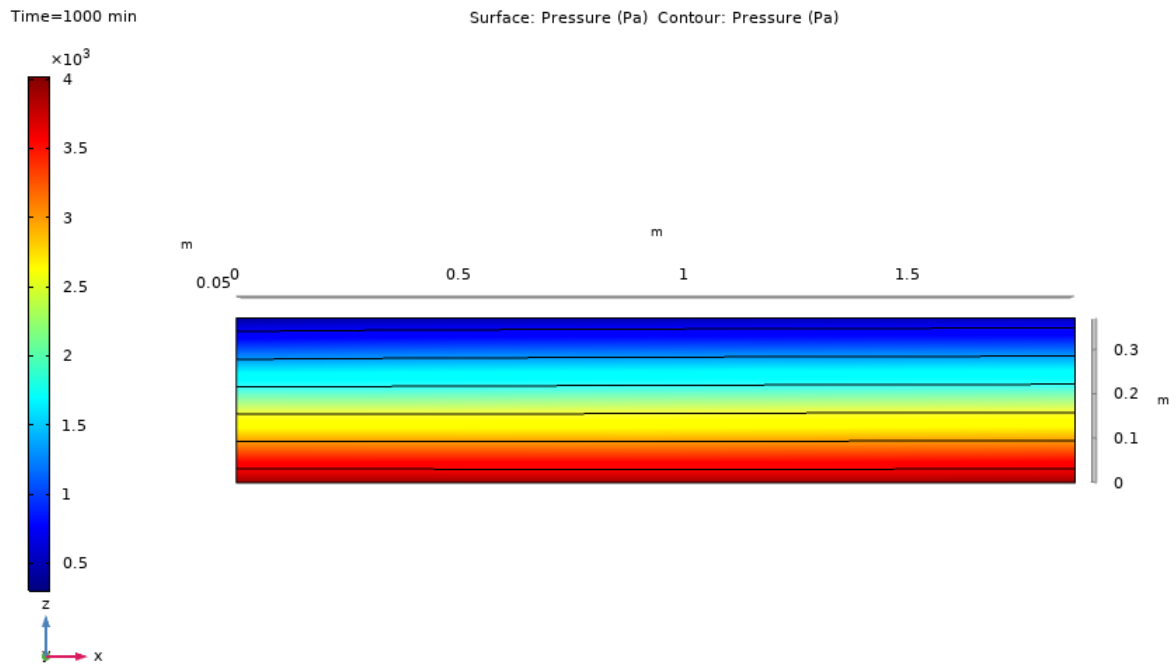
### 6.1.4. Stacionarnost modela

Usvaja se da je model postigao stacionarno stanje ako daljnjim povećanjem vremena trajanja simulacije nema promjene u rezultatu. U ovom slučaju stacionarnost je postignuta ako se duljina klina povećanjem vremena trajanja simulacije ne mijenja.

Vremenski korak postavljen je na 5 min ( $\Delta t = 5 \text{ min}$ ), trajanje simulacije je 1300 min. Stacionarno stanje postignuto je na 1000 min ( Slika 12 ).

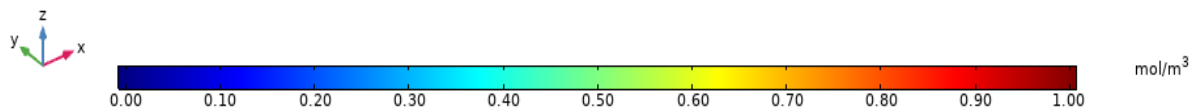


Slika 12. Grafički prikaz stacionarnosti modela koje odgovara trajanju simulacije od  $t = 1300 \text{ min}$

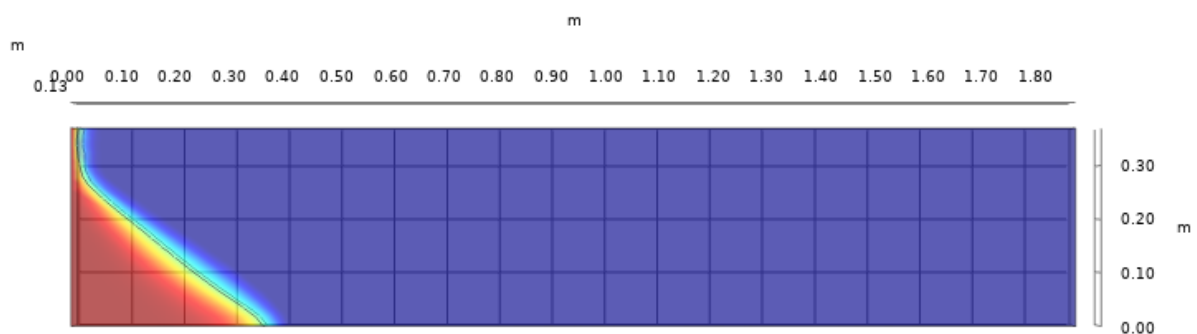


Slika 13. Snimak stacionarnog tlaka koje odgovara trajanju simulacije od  $t = 1300$  min

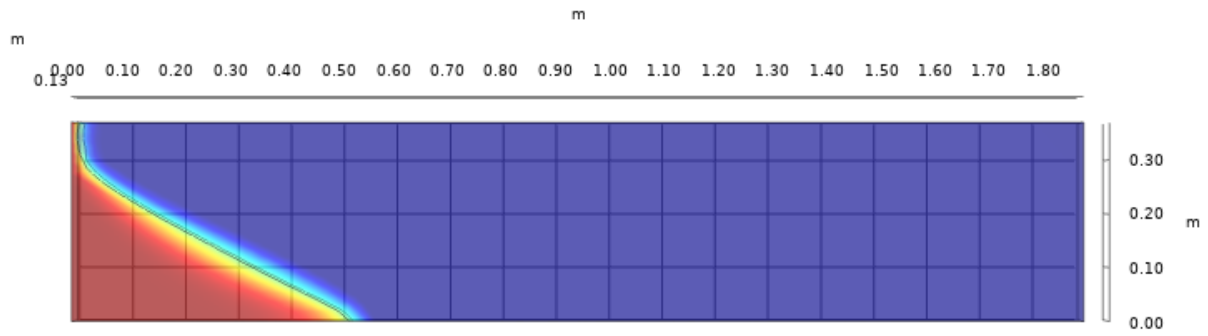
## 6.2. Prodor klina soli – početno stanje bez uvođenja zaštite



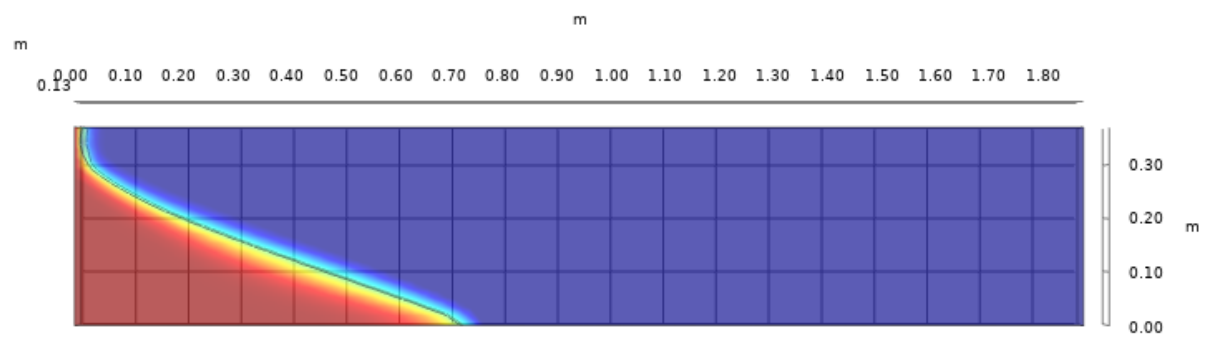
Slika 14. Prikaz legende za koncentraciju  $c$  mol/m<sup>3</sup>



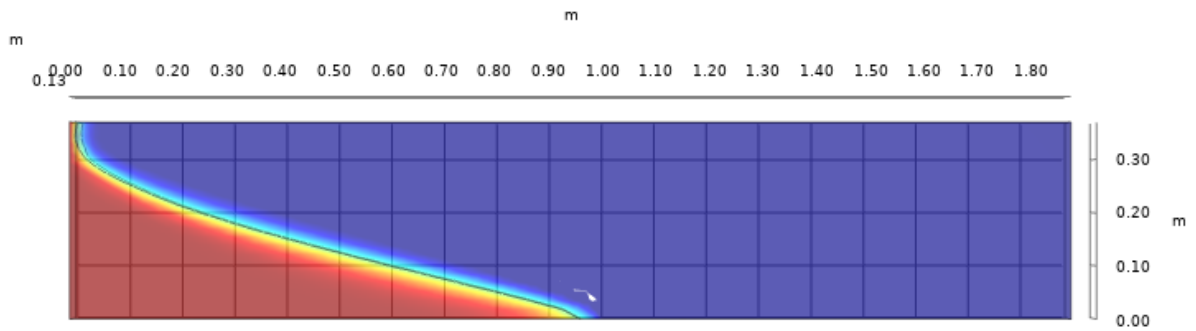
Slika 15. Snimak numerički zadane simulacije prodora slane vode koje odgovara trajanju  $t = 15$  min



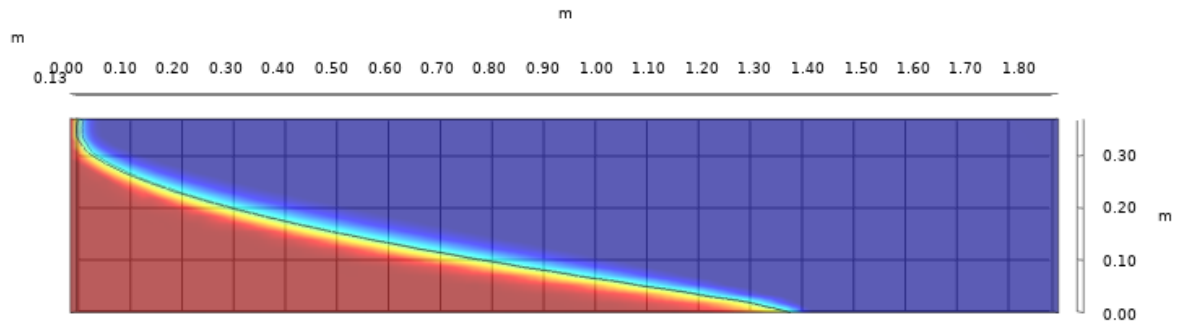
Slika 16. Snimak numerički zadane simulacije prodora slane vode koje odgovara trajanju  $t = 30$  min



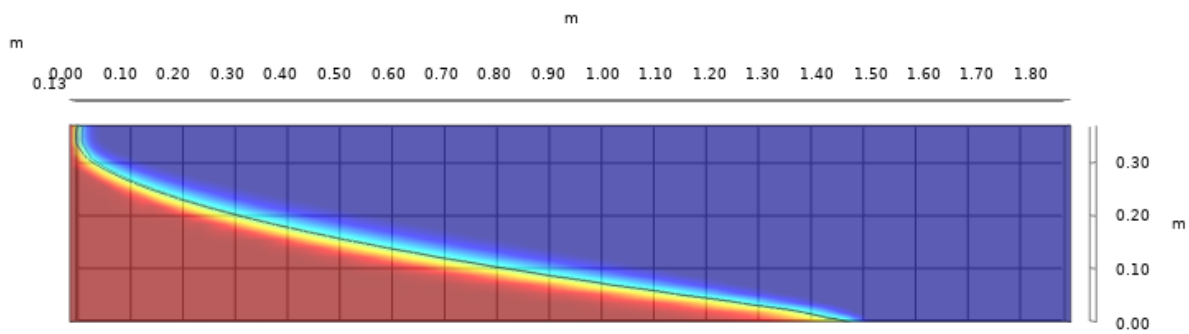
Slika 17. Snimak numerički zadane simulacije prodora slane vode koje odgovara trajanju  $t = 60$  min



Slika 18. Snimak numerički zadane simulacije prodora slane vode koje odgovara trajanju  $t = 120$  min



Slika 19. Snimak numerički zadane simulacije prodora slane vode koje odgovara trajanju  $t = 480$  min



Slika 20. Snimak numerički zadane simulacije prodora slane vode koje odgovara trajanju  $t = 1000$  min

### 6.3. Zdenac za crpljenje

Zdenac za crpljenje kao mjera zaštite radi na principu crpljenja vode iz vodonosnika, tj. zahvaćanje slanog klina i izbacivanja vode van. Odabirom parametara pozicije zdenca i količine crpljenja traži se najbolje rješenje za smanjenje prodora klina u pogledu funkcionalnosti i ekonomičnosti.

Pokrenute su simulacije modela sa mijenjanjem parametara udaljenosti zdenca od lijevog ruba domene, dubinom zdenca i količinom crpljenja.

Dno zdenca je otvoreno za protok, a po oplošju protok je jednak nuli.

Stacionarno stanje postignuto je za vrijeme od 1000 min i svi prikazani rezultati odgovaraju trajanju simulacije od  $t = 1000$  min.

Parametri:

- Radijus zdenca  $r = 5$  mm
- Vrijeme trajanja simulacije  $t = 1000$  min
- Udaljenost zdenca od lijevog ruba domene  $\Delta x = 10, 20, 30, 40$  i  $50$  cm
- Dubina crpljenja  $d = 20, 25, 30$  i  $35$  cm
- Brzina  $v = 0.005; 0.01; 0.02$  m/s
- Površina presjeka zdenca  $A = \pi r^2$

$$A = 0.00007854 \text{ m}^2$$

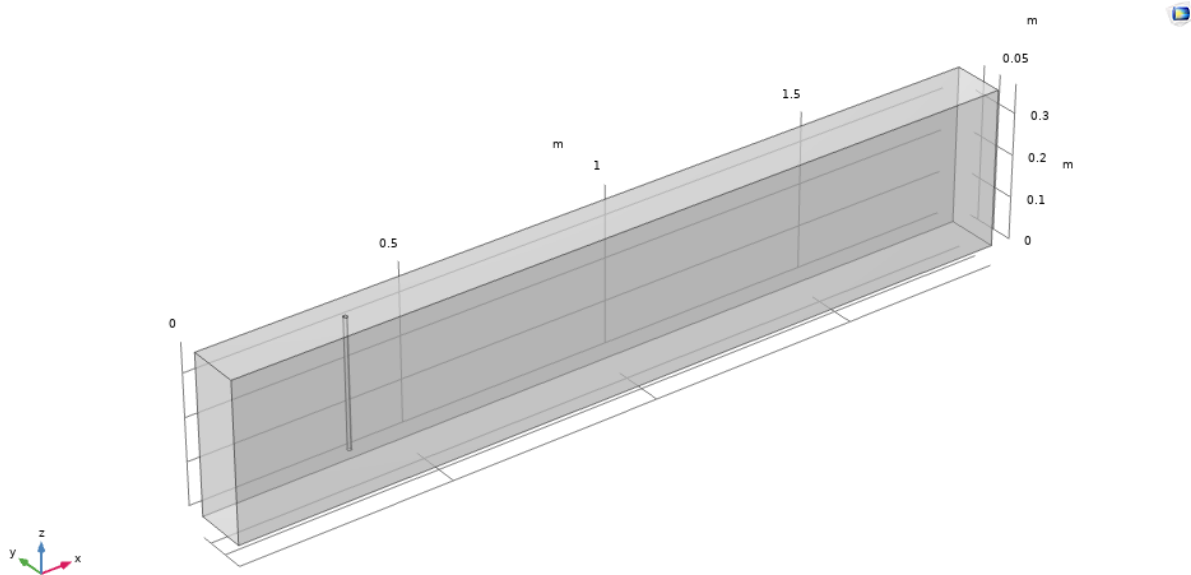
- Količina crpljenja

$$Q = v \cdot A$$

$$\text{Za brzinu } v = 0.005 \text{ m/s} \rightarrow Q = 3.927 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Za brzinu } v = 0.01 \text{ m/s} \rightarrow Q = 7.854 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Za brzinu } v = 0.02 \text{ m/s} \rightarrow Q = 1.5708 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$



Slika 21. 3D prikaz geometrije zdenca za crpljenje

### 6.3.1. Analiza utjecaja količine crpljenja $Q$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

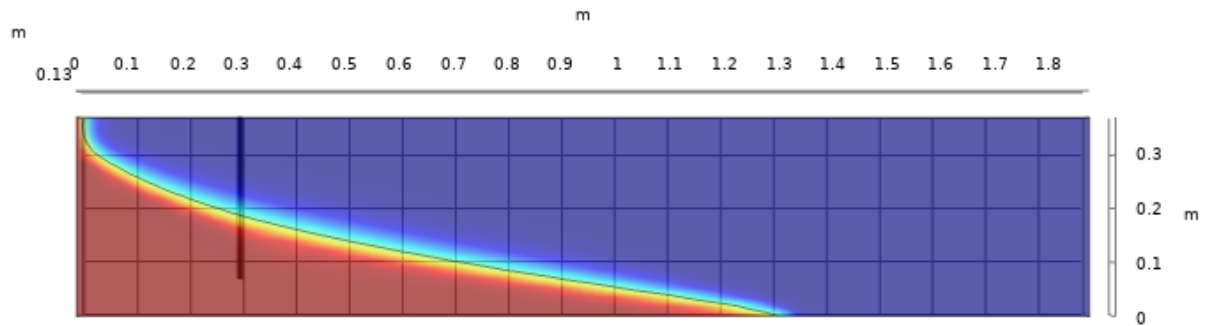
Variranjem količine crpljenja promatra se utjecaj količine crpljenja zdenca na duljinu prodora slanog klina. Očekivanje je da što je količina crpljenja veća to je klin kraći. Kroz 3 pokrenute simulacije za 3 različita iznosa količine crpljenja pretpostavka je potvrđena. Rezultati su prikazani za stacionarno stanje koje je postignuto za vrijeme  $t = 1000$  min

Za potrebe ove analize parametri udaljenost od ruba  $\Delta x$  i dubina crpljenja  $d$  su fiksirani.

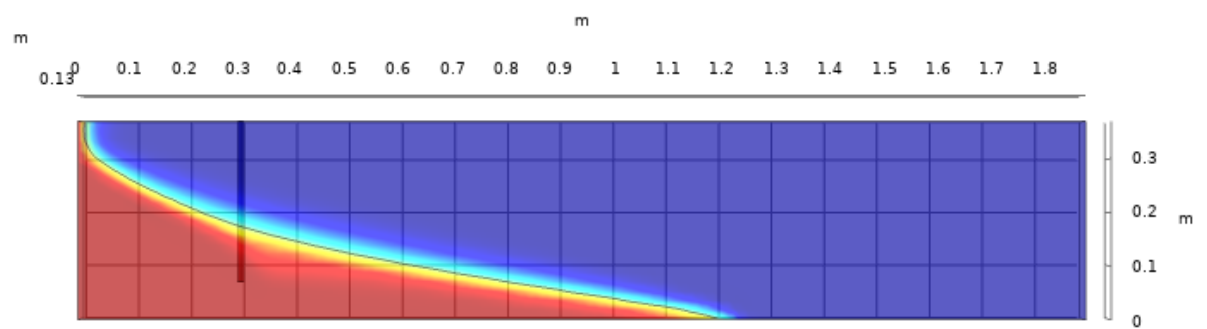
Zadani parametri:

- $t = 1000$  min
- $\Delta x = 30$  cm
- $d = 30$  cm
- $v_1 = 0.005$  m/s  $\rightarrow Q = 3.927 \cdot 10^{-7}$   $\text{m}^3/\text{s}$
- $v_2 = 0.01$  m/s  $\rightarrow Q = 7.854 \cdot 10^{-7}$   $\text{m}^3/\text{s}$
- $v_3 = 0.02$  m/s  $\rightarrow Q = 1.5708 \cdot 10^{-6}$   $\text{m}^3/\text{s}$

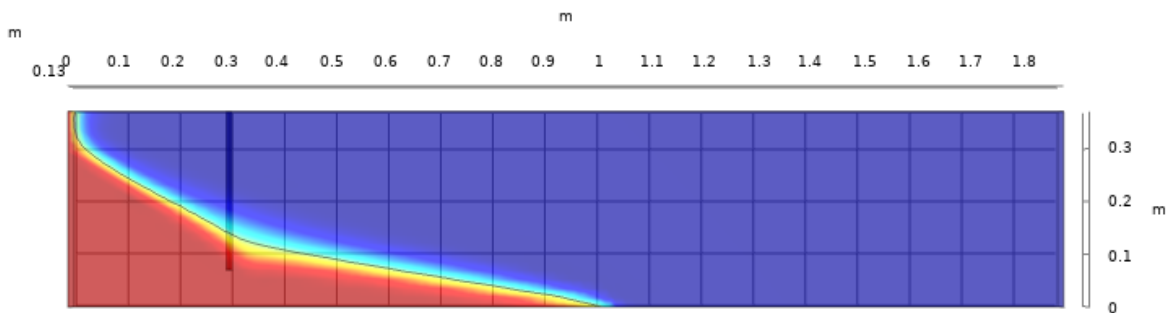
Za najveću količinu crpljenja  $Q = 1.5708 \cdot 10^{-6}$   $\text{m}^3/\text{s}$  dobivena je najmanja duljina klina (Slika 16).



Slika 22. Količina crpljenja  $Q = 3.927 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  za vrijeme trajanja  $t = 1000 \text{ min}$

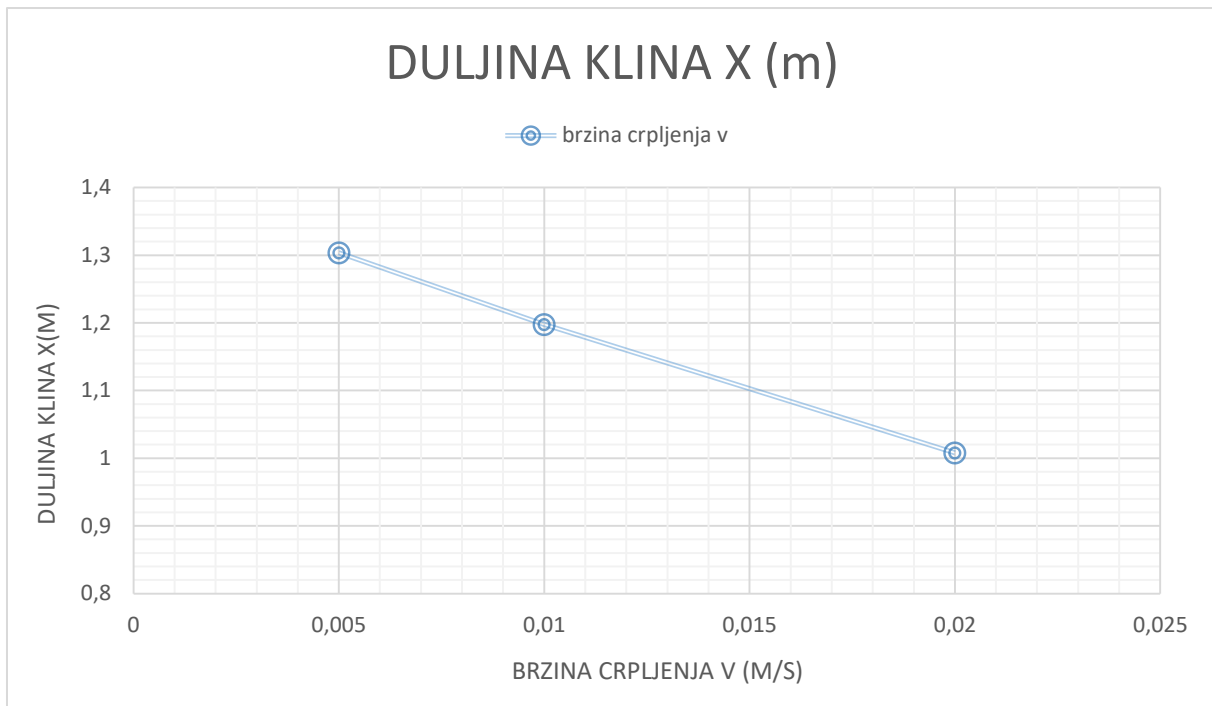


Slika 23. Količina crpljenja  $Q = 7.854 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  za vrijeme trajanja  $t = 1000 \text{ min}$



Slika 24. Količina crpljenja  $Q = 1.5708 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  za vrijeme trajanja  $t = 1000 \text{ min}$





Slika 25. Grafički prikaz ovisnosti promjene količine crpljenja na duljinu klina

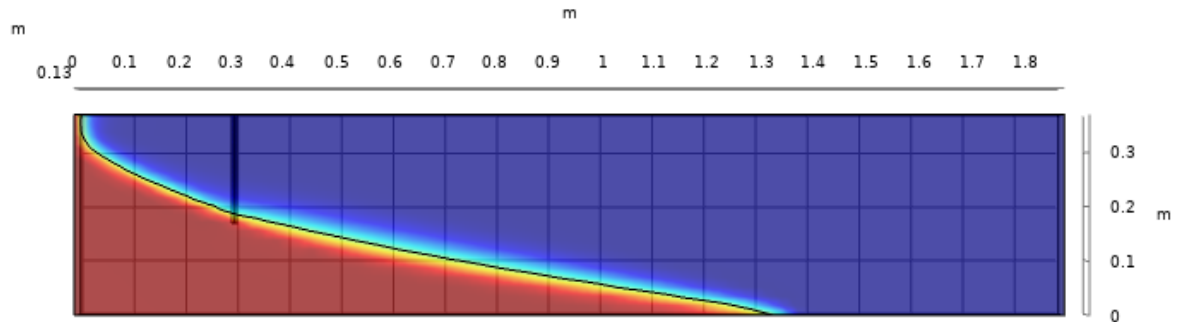
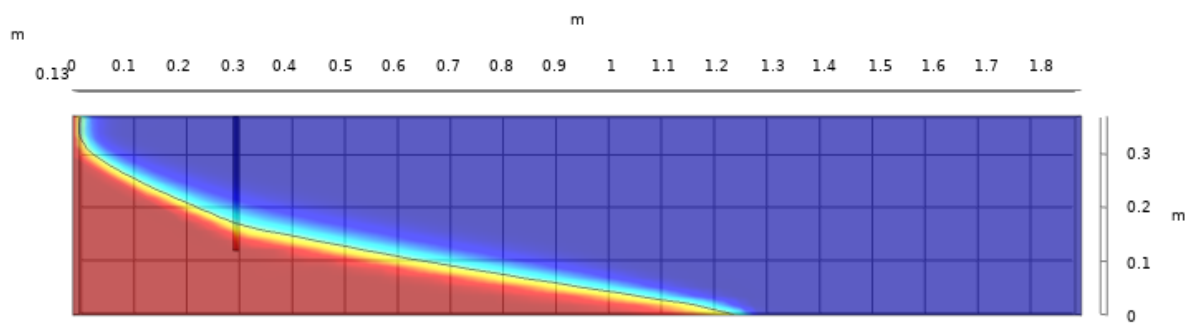
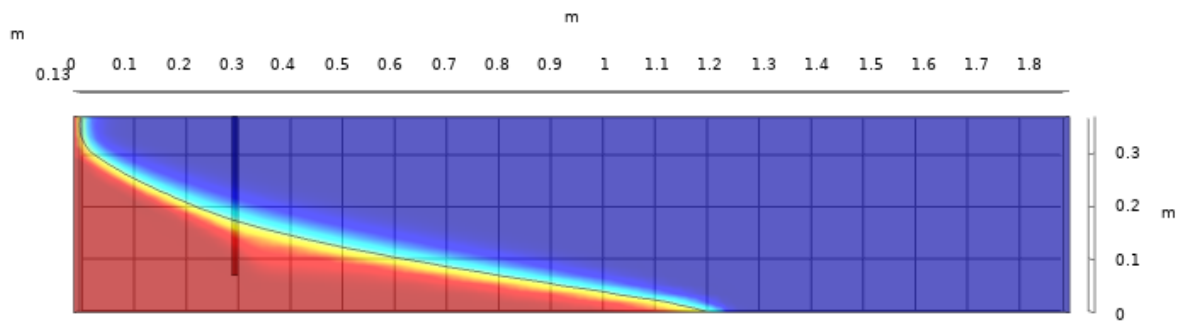
### 6.3.2. Analiza dubine crpljenja d (cm)

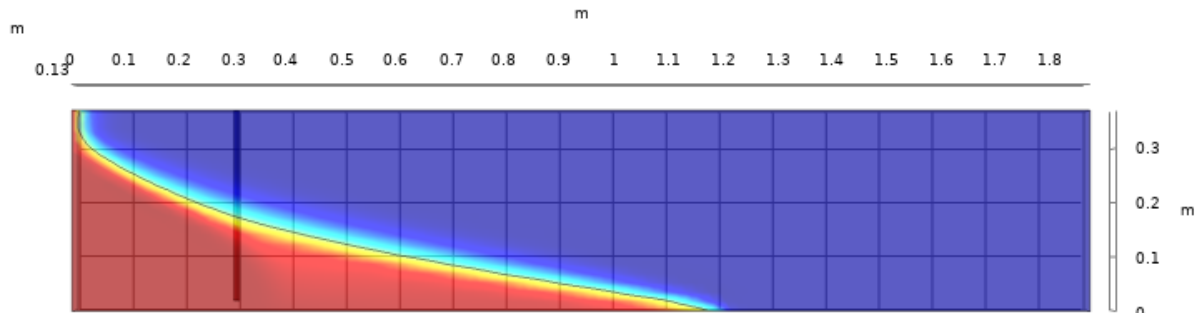
Promatra se utjecaj dubine zdenca od površine na duljinu prodora klina. Zdenac se postavlja na dubinu 20, 25, 30 i 35 cm od gornjeg ruba domene. Na dnu zdenca vrši se crpljenje. Količina crpljenja i udaljenost zdenca od ruba su fiksirani, a simulacije su izrađene za različite dubine.

Što je dubina crpljenja veća, zdenac je bliže slanom klinu, zahvaća više slane vode i rezultat je kraći klin. Rezultati su prikazani za krajnje stacionarno stanje koje je postignuto za vrijeme  $t = 1000$  min

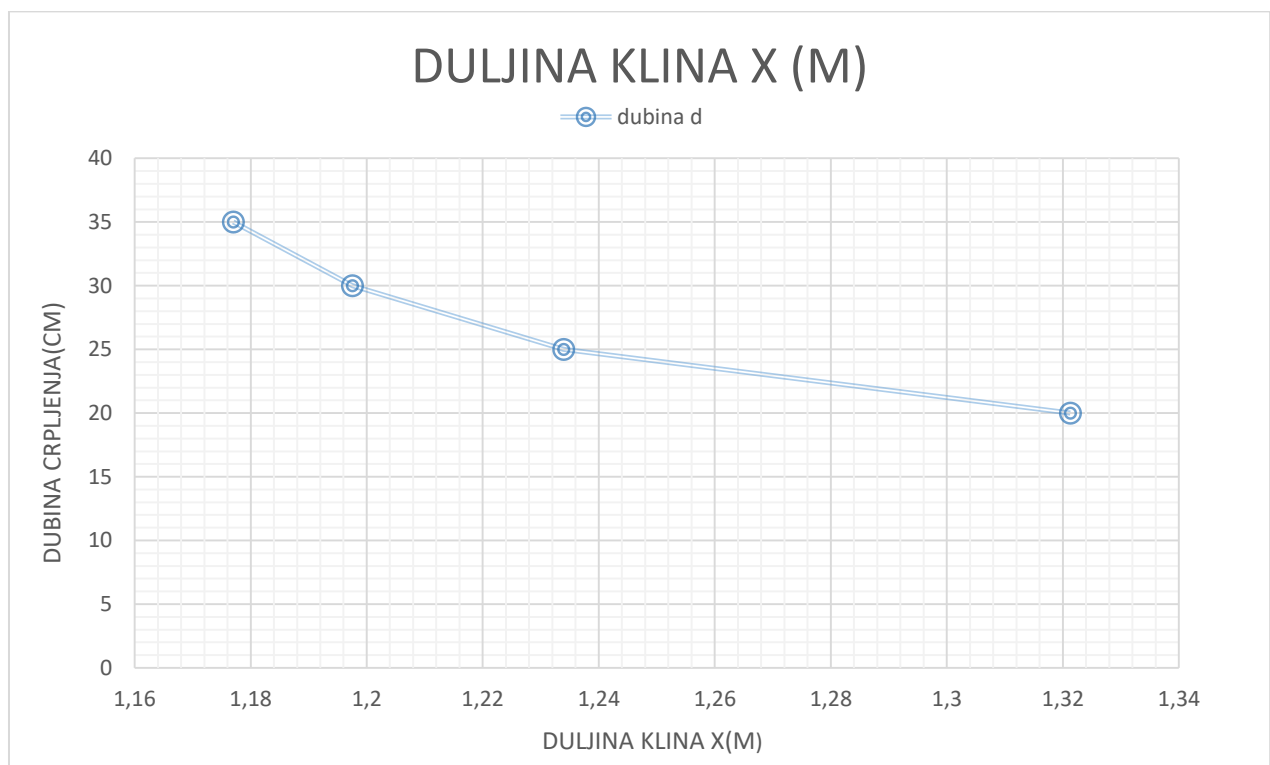
Zadani parametri:

- $t = 1000$  min
- $\Delta x = 30$  cm
- $v = 0.01$  m/s  $\rightarrow Q = 7.854 \cdot 10^{-7}$  m<sup>3</sup>/s
- $d = 20; 25; 30; 35$  cm

Slika 26. Dubina crpljenja  $d = 20$  cm za vrijeme trajanja  $t = 1000$  minSlika 27. Dubina crpljenja  $d = 25$  cm za vrijeme trajanja  $t = 1000$  minSlika 28. Dubina crpljenja  $d = 30$  cm za vrijeme trajanja  $t = 1000$  min



Slika 29. Dubina crpljenja  $d = 35$  cm za vrijeme trajanja  $t = 1000$  min



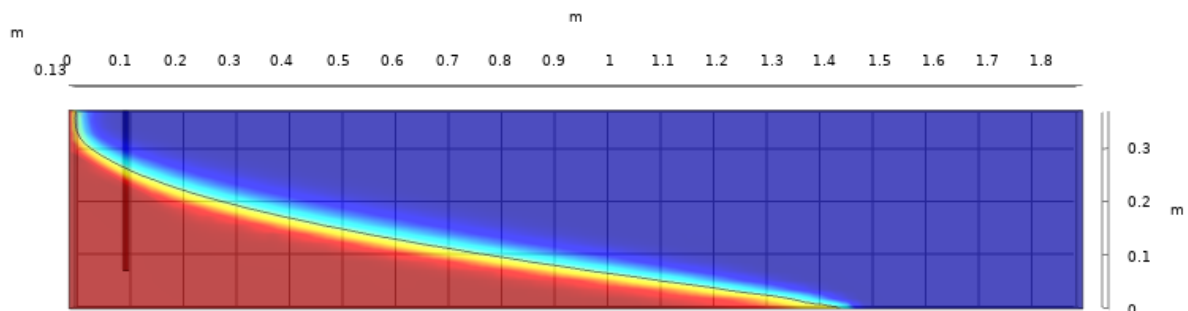
Slika 30. Grafički prikaz ovisnosti promjene dubine crpljenja na duljinu klina

### 6.3.3. Analiza udaljenosti zdenca od ruba domene $\Delta x$ (cm)

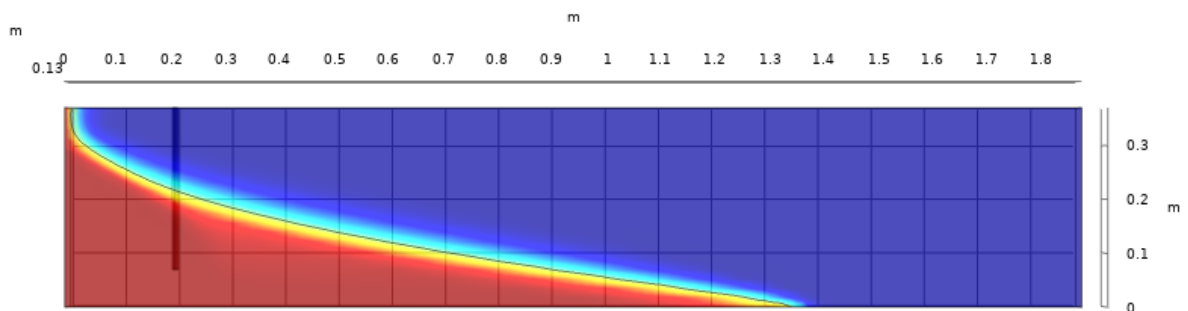
Zdenac je postavljen na različite udaljenosti od lijevog ruba domene  $\Delta x = 10, 20, 30, 40$  i  $50$  cm. Dobiveni rezultati pokazuju da što je zdenac pozicioniran dalje od lijevog ruba domene, tj. što je  $\Delta x$  veći to je klin manji. Rezultati su prikazani za stacionarno stanje koje je postignuto za vrijeme  $t = 1000$  min.

Zadani parametri:

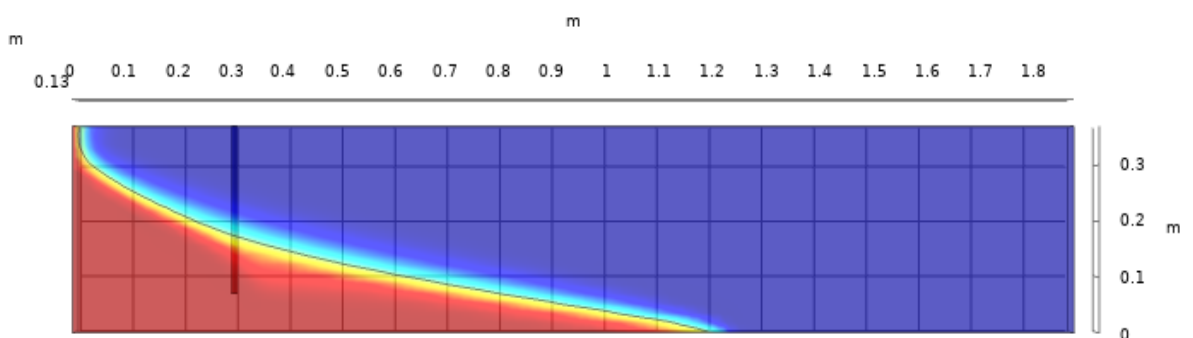
- $t = 1000$  min
- $d = 30$  cm
- $v = 0.01$  m/s  $\rightarrow Q = 7.854 \cdot 10^{-7}$  m<sup>3</sup>/s
- $\Delta x = 10; 20; 30; 40; 50$  cm



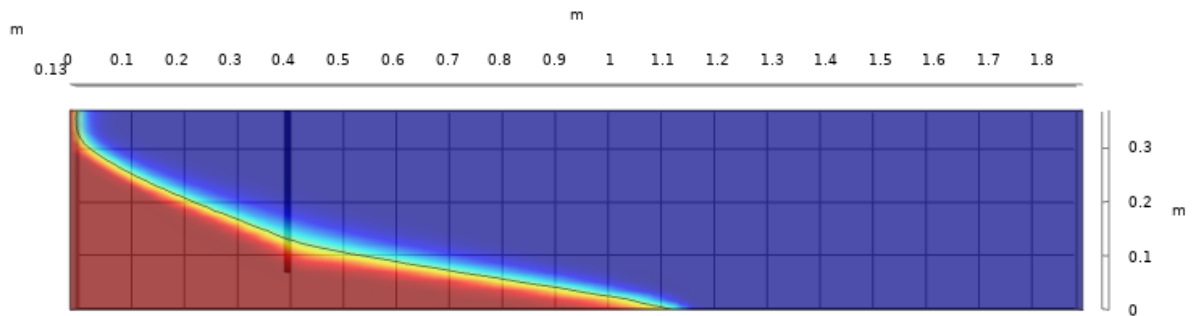
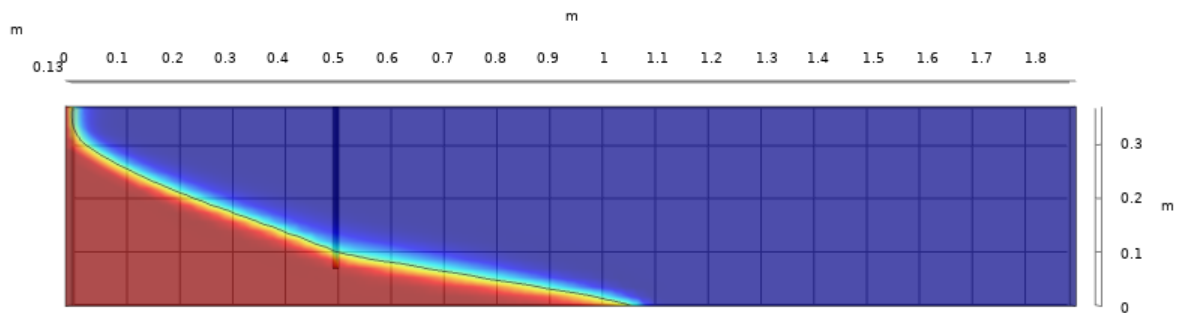
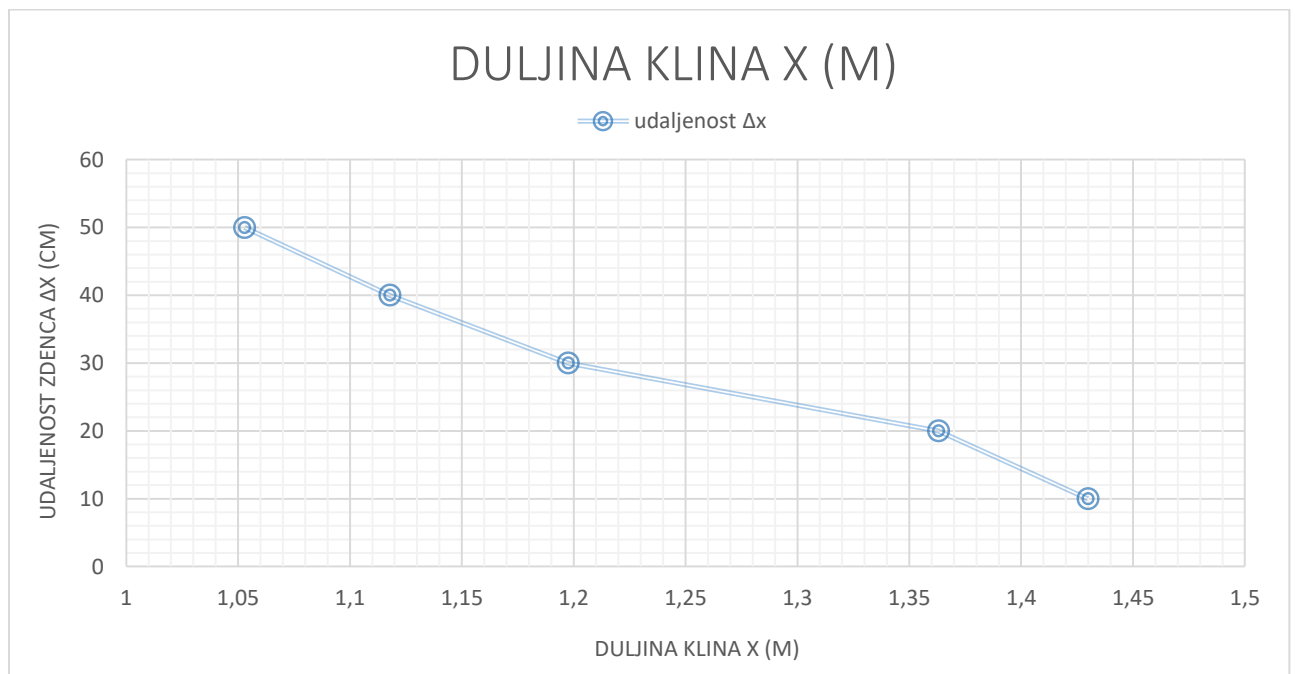
Slika 31. Udaljenost zdenca od ruba domene  $\Delta x = 10$  cm za vrijeme trajanja  $t = 1000$  min



Slika 32. Udaljenost zdenca od ruba domene  $\Delta x = 20$  cm za vrijeme trajanja  $t = 1000$  min



Slika 33. Udaljenost zdenca od ruba domene  $\Delta x = 30$  cm za vrijeme trajanja  $t = 1000$  min

Slika 34. Udaljenost zdenca od ruba domene  $\Delta x = 40$  cm za vrijeme trajanja  $t = 1000$  minSlika 35. Udaljenost zdenca od ruba domene  $\Delta x = 50$  cm za vrijeme trajanja  $t = 1000$  min

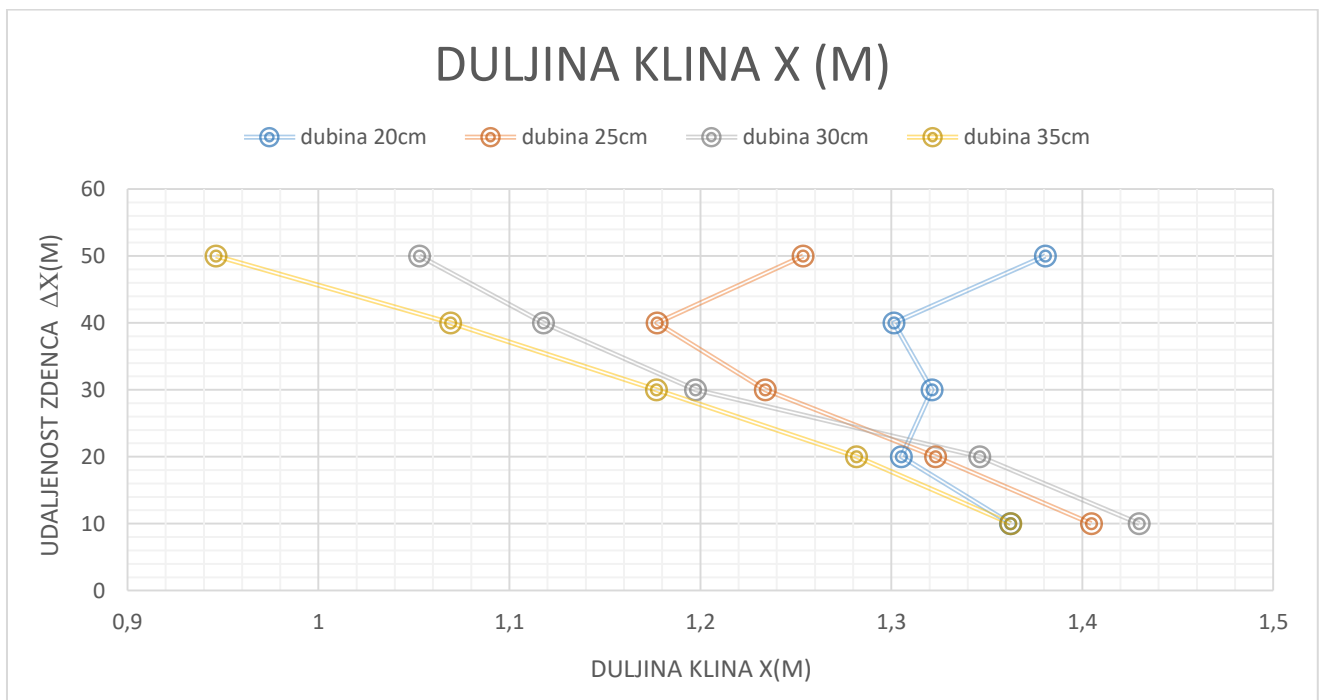
Slika 36. Grafički prikaz ovisnosti promjene udaljenosti zdenca na duljinu klina

### 6.3.4. Analiza zajedničkog utjecaja udaljenosti i dubine na duljinu klina

U prethodnim rezultatima promatrana je ovisnost jednog parametra dok su druga dva fiksirana. U sljedećem grafu prikazani su rezultati kalibracije dvaju parametara istovremeno (Slika 37). Analizirano je kako utječe promjena udaljenosti zdenca od ruba ( $\Delta x$ ) uz promjenu dubine crpljenja ( $d$ ). Izračunato je 20 kombinacija. Globalno gledano po prethodnim rezultatima utvrđeno je da je najpogodniji slučaj kada je *dubina crpljenja najveća* i *udaljenost zdenca od ruba najveća*. Međutim, kada se promatra zajednički promjenu dubine i udaljenosti dolazi do odstupanja od prethodnih zaključaka, tj. pojavljuju se lokalne promjene.

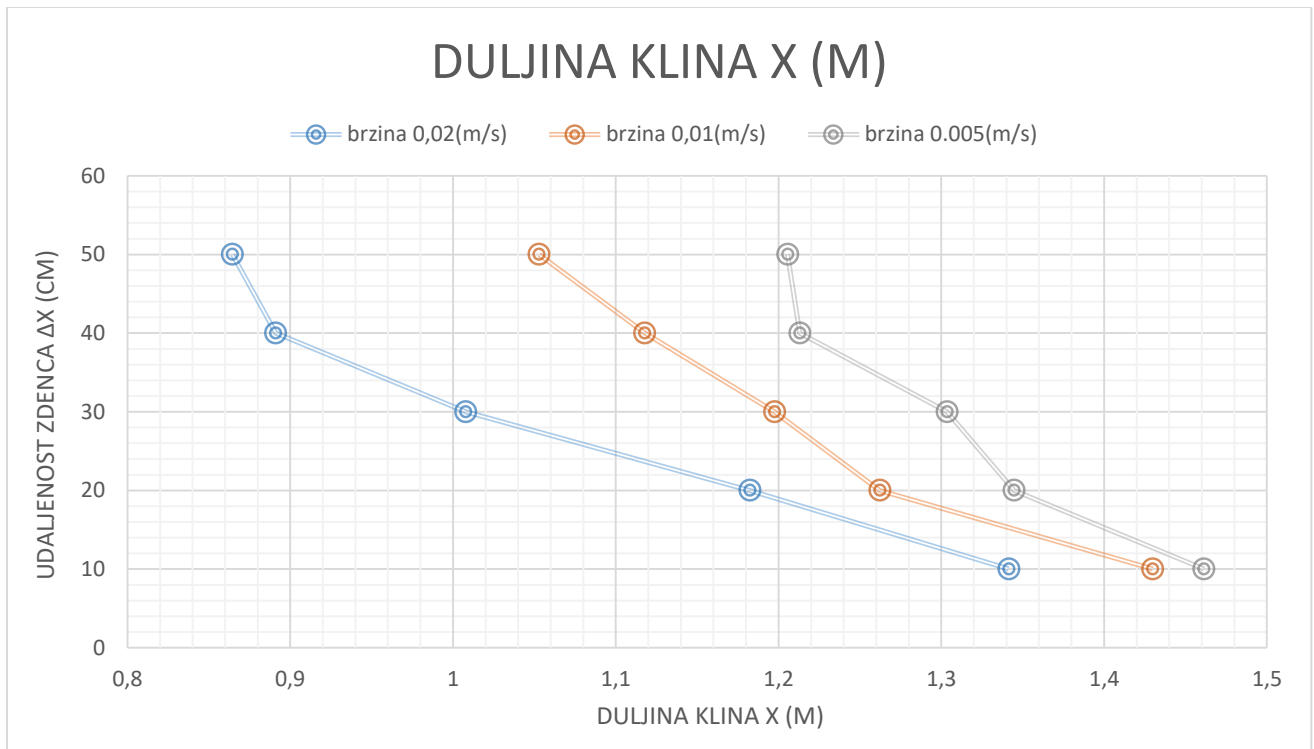
Za manje dubine 20 i 25 cm veća udaljenost ne znači povoljniji slučaj tj. kraći klin, događa se suprotno. Jednako i za udaljenosti manje od 30 cm postoje različitosti. U pravilu što se više zdenac udaljava od ruba domene klin je duži, ali na slici je vidljivo da na udaljenosti 10 i 20 cm veća dubina znači veći klin (dubina 25 cm i 30 cm), a dubina 20 cm i 35 cm imaju približne duljine klina.

Pojednostavljeno, može se zaključiti da za manje udaljenosti zdenca o ruba domene dubina ima velik utjecaj na duljinu klina dok na većim udaljenostima (više od 30 cm) dolazi do stabilizacije i rješenja poprimaju očekivane vrijednosti.



Slika 37. Grafički prikaz ovisnosti dubine crpljenja i udaljenosti zdenca na duljinu klina

Na Slici 38. prikazana je varijacija parametara brzine i udaljenosti zdenca i njihov utjecaj na duljinu klina. Očito je da veća brzina daje manju duljinu klina kao i veća udaljenost od ruba.



Slika 38. Grafički prikaz ovisnosti brzine crpljenja i udaljenosti zdenca na duljinu klina

#### 6.4. Kanal za navodnjavanje

Kao druga mjera zaštite odabran je kanal za navodnjavanje koji ima funkciju infiltracije čiste vode pod tlakom i smanjenja prodora klina. Ova simulacija ima za cilj provjeriti učinak ispuštanja čiste vode u vodonosnik.

Početni uvjet je domena pod tlakom na razini 40 cm od dna domene.

Nizvodni lijevi rubni uvjet je  $h = 40$  cm, a uzvodni desni  $h = 41$  cm.

Kanal je s gornje strane pod tlakom, sa lijeve i desne strane kanala kao i kroz dno omogućen je protok. Za razinu vode u kanalu odabrana su tri slučaja:

- jednaka desnom rubnom uvjetu  $h = 41$  cm
- za 0.5 cm veća od desnog rubnog uvjeta  $h = 41.5$  cm
- za 1 cm veća od desnog rubnog uvjeta  $h = 42$  cm

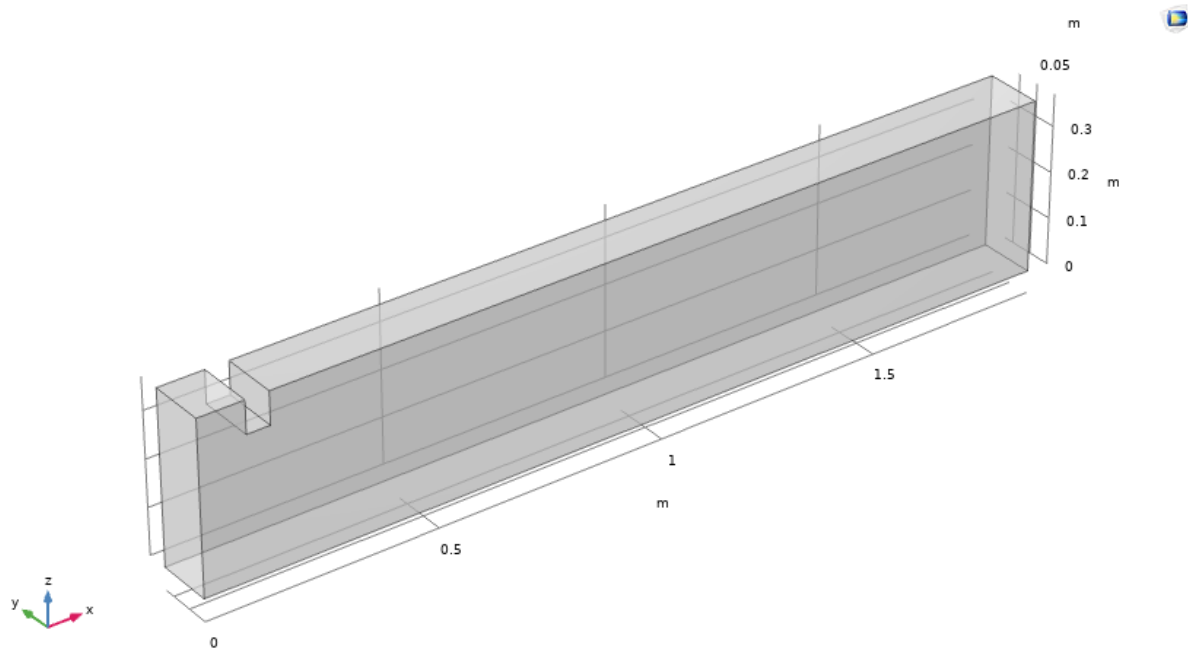
Početni rubni uvjet za transport je koncentracija na cijeloj domeni jednaka nuli. Rubni uvjet za transport u kanalu je zadan kao  $C = 0 \text{ mol/m}^3$ .

Osim razine vode u kanalu promatra se i utjecaj dubine kanala od vrha domene i udaljenost kanala od lijevog ruba.

Stacionarno stanje odgovara trajanju  $t = 600 \text{ min}$ . Svi rezultati očitani su za trajanje  $t = 600 \text{ min}$ .

Zadani parametri:

- Širina kanala  $\check{s} = 5 \text{ cm}$
- Dubina kanala  $d = 2; 4; 6; 8 \text{ cm}$
- Debljina kanala  $y = 12,5 \text{ cm}$
- Udaljenost kanala od ruba domene  $\Delta x = 10; 20; 30; 40; 50 \text{ cm}$
- Razina vode u kanalu  $h = 41; 41.5; 42 \text{ cm}$
- Vrijeme trajanja simulacije  $t = 600 \text{ min}$



Slika 39. 3D prikaz geometrije kanala za navodnjavanje



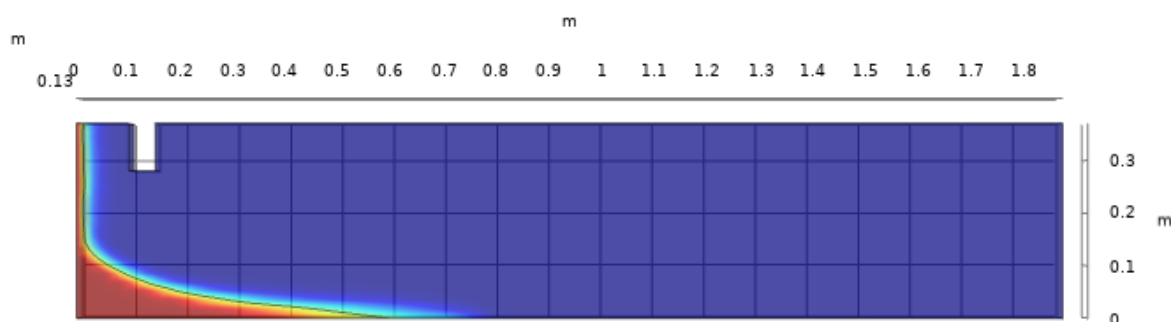
### 6.4.1. Analiza utjecaja razine vode u kanalu na smanjenje duljine klina

Rezultati uz promjenu razine vode u kanalu, simulacije izrađene za 3 različite razine. Parametri dubine kanala i udaljenosti kanala od ruba domene su fiksirani ( $\Delta x = 10$  cm;  $d = 8$  cm), analizira se samo utjecaj razine vode u kanalu.

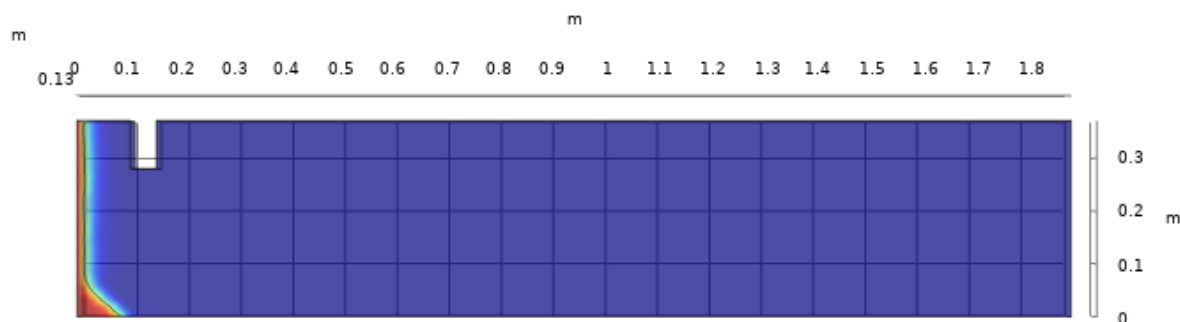
Zadani parametri:

- $t = 600$  min
- $d = 8$  cm
- $\Delta x = 10$  cm
- $h = 41; 41.5; 42$  cm

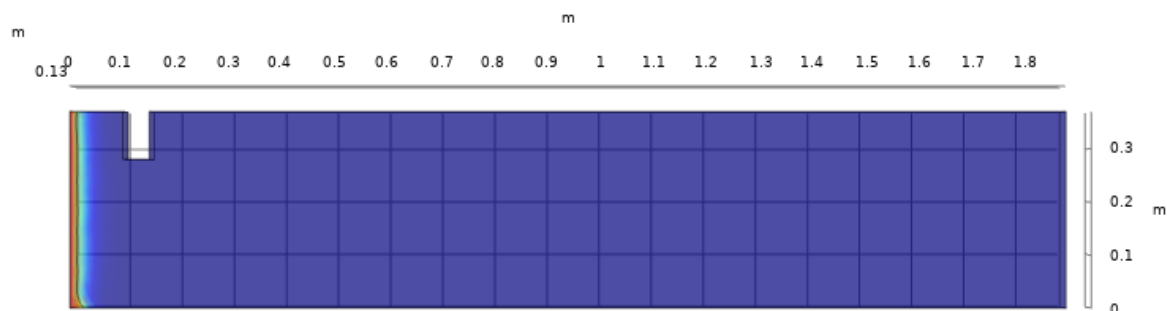
Ako se razina vode u kanalu  $h$  povećava za očekivati je da se klin smanjuje što je sukladno rezultatima koji su dobiveni (Slika 43). Rezultat sa najvećom razinom vode u kanalu ( $h = 42$  cm) daje najmanju duljinu klina. Rezultati su prikazani za stacionarno stanje koje je postignuto za vrijeme  $t = 600$  min.



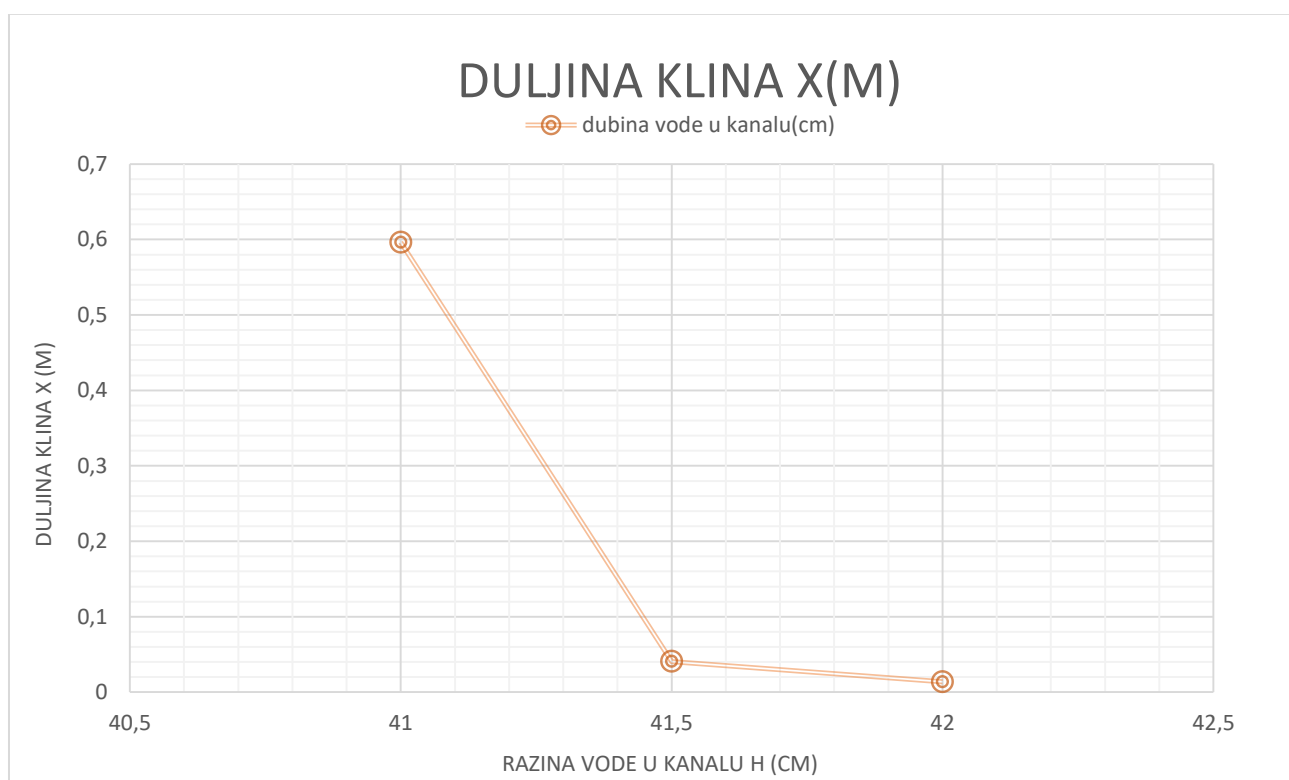
Slika 40. Razina vode u kanalu  $h = 41$  cm za vrijeme trajanja  $t = 600$  min



Slika 41. Razina vode u kanalu  $h = 41.5$  cm za vrijeme trajanja  $t = 600$  min



Slika 42. Razina vode u kanalu  $h = 42$  cm za vrijeme trajanja  $t = 600$  min



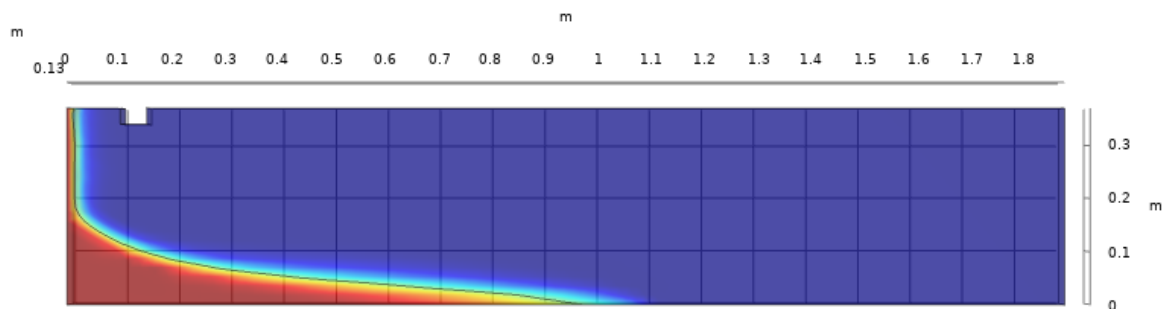
Slika 43. Grafički prikaz ovisnosti dubine vode u kanalu na duljinu klin

#### 6.4.2. Analiza utjecaja dubine kanala na smanjenje duljine klina

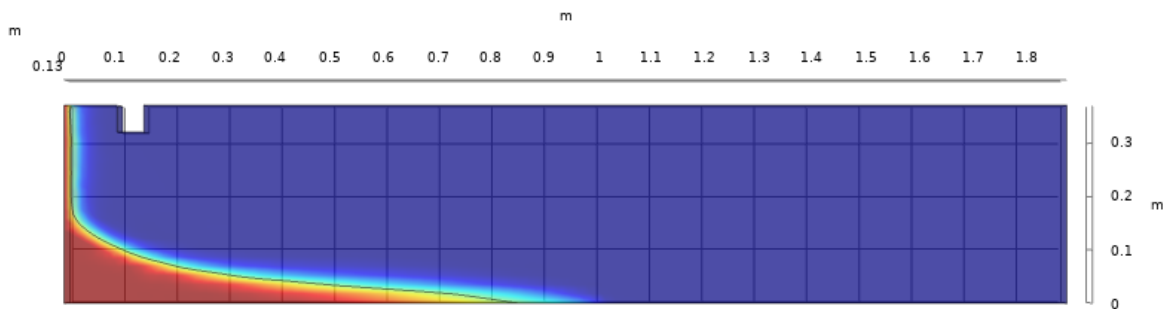
Odabrane su dubine kanala 2, 4, 6 i 8 cm. Za najveću dubinu kanala rezultat je najmanja duljina klina, što je i očekivano. Prikazana je ovisnost dubine o duljini klina, crta trenda skoro je linearna što ukazuje da se sa povećanjem dubine klin približno linearno smanjuje (Slika 48). Rezultati su prikazani za stacionarno stanje koje je postignuto za vrijeme  $t = 600$  min.

Zadani parametri:

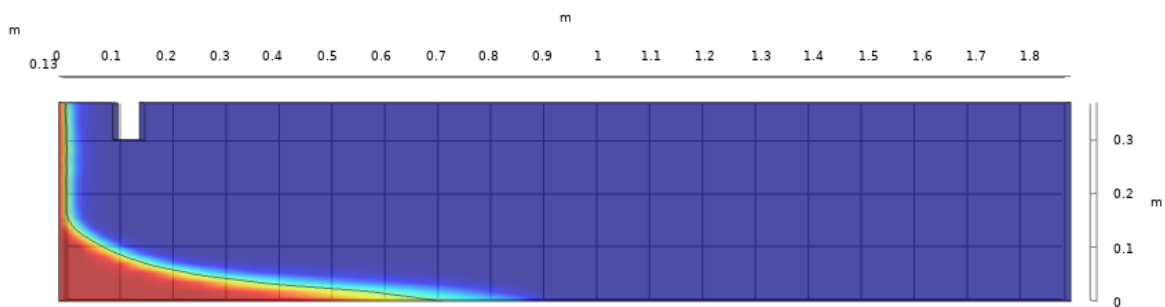
- $t = 600$  min
- $\Delta x = 10$  cm
- $h = 41$  cm
- $d = 2; 4; 6; 8$  cm



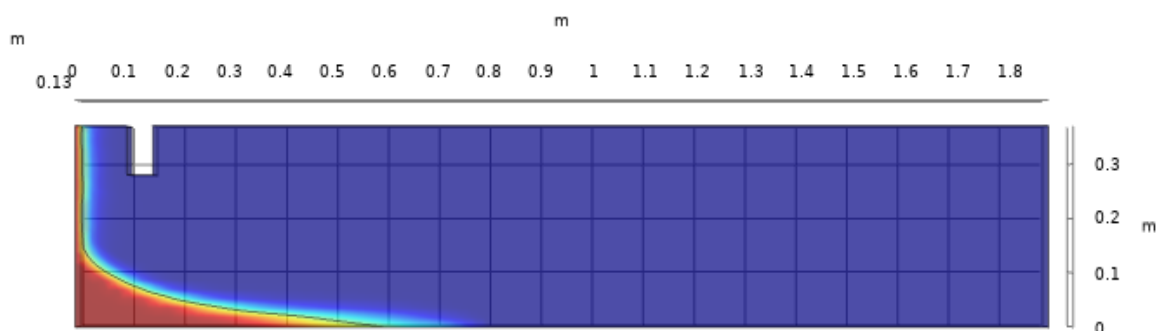
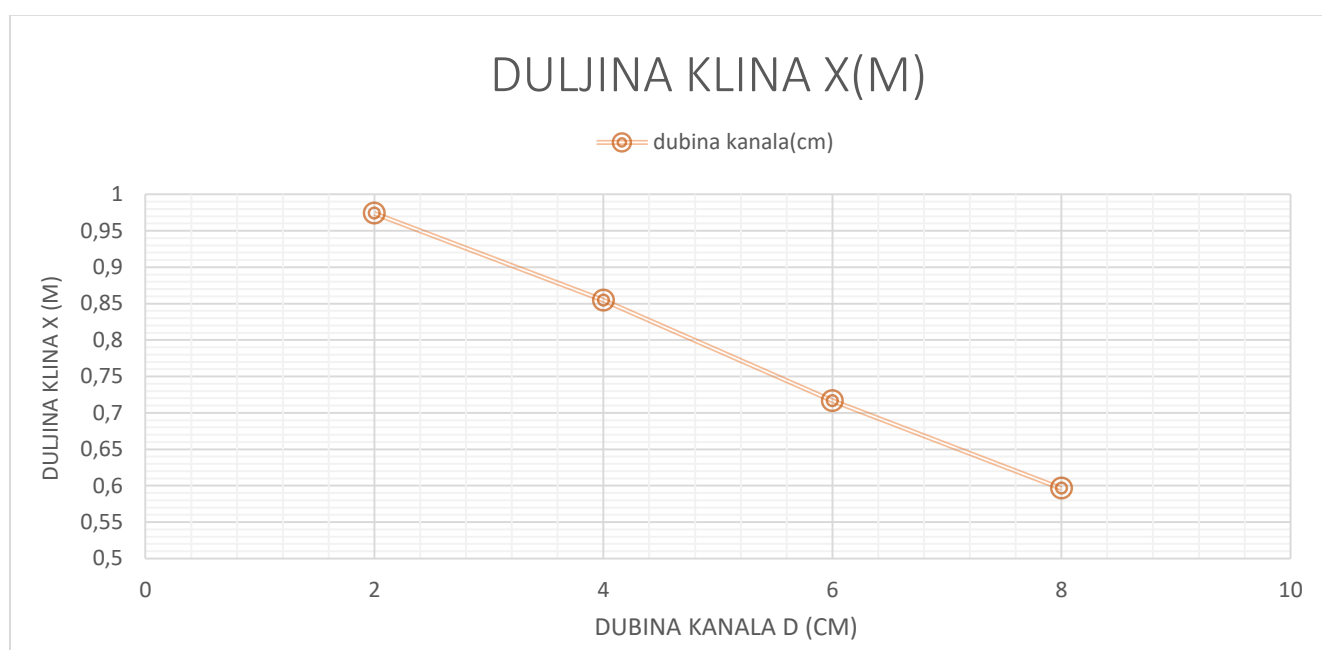
Slika 44. Dubina kanala  $d = 2$  cm za vrijeme trajanja  $t = 600$  min



Slika 45. Dubina kanala  $d = 4$  cm za vrijeme trajanja  $t = 600$  min



Slika 46. Dubina kanala  $d = 6$  cm za vrijeme trajanja  $t = 600$  min

Slika 47. Dubina kanala  $d = 8$  cm za vrijeme trajanja  $t = 600$  min

Slika 48. Grafički prikaz ovisnosti dubine kanala na duljinu klina

### 6.4.3. Analiza udaljenosti kanala od ruba domene na duljinu klina

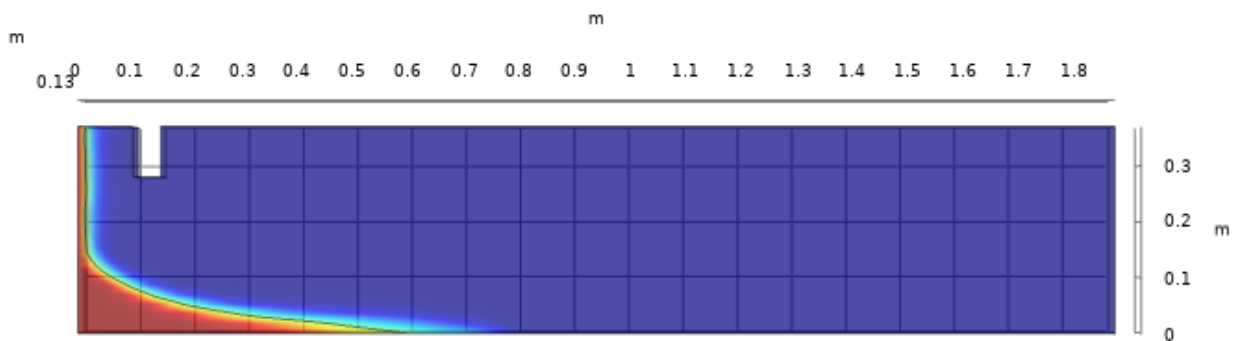
Kanal je postavljen na varijabilnoj udaljenosti i napravljene su simulacije modela za svaku udaljenost. Prilikom varijacije udaljenosti kao u prethodnim slučajevima druga dva parametra su fiksirana. Svi rezultati su očitani za vrijeme trajanja simulacije  $t = 600$  min.

Za analizu udaljenosti ne može se jednoznačno odrediti utjecaj na duljinu klina. Klin se za udaljenosti manje od 30 cm povećanjem udaljenosti smanjuje. Zatim za veće udaljenosti što se više odmiče od ruba klin je duži. U sljedećem poglavlju detaljnije zajednička analiza udaljenosti

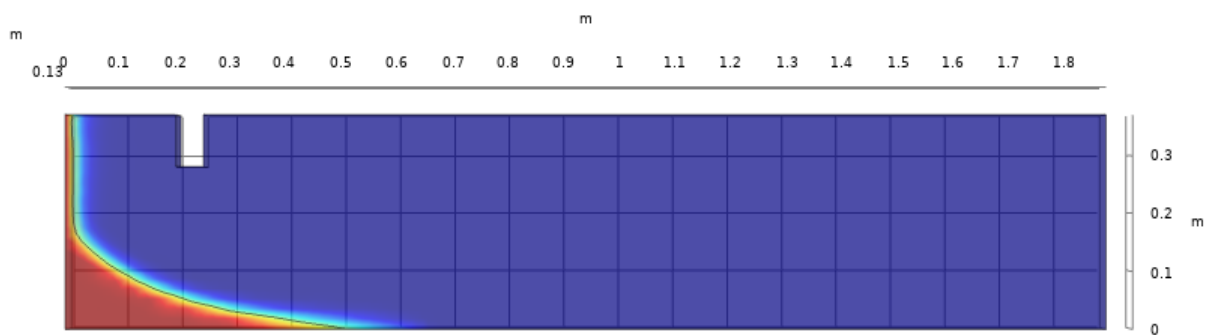
i dubine (6.4.4.). Rezultati su prikazani za stacionarno stanje koje je postignuto za vrijeme  $t = 600$  min.

Zadani parametri:

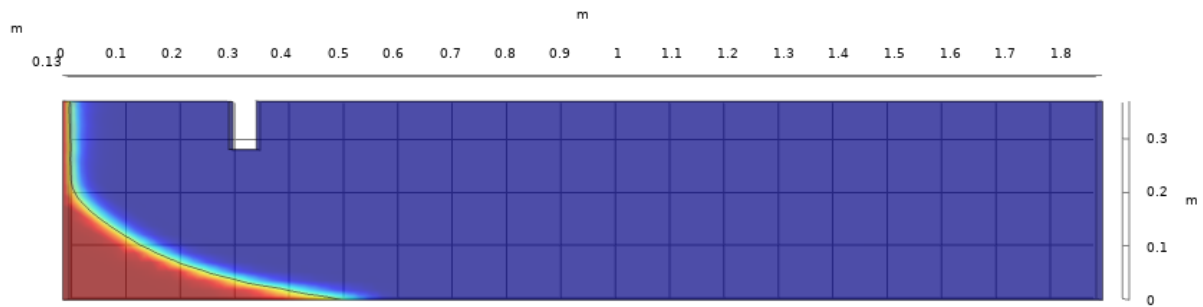
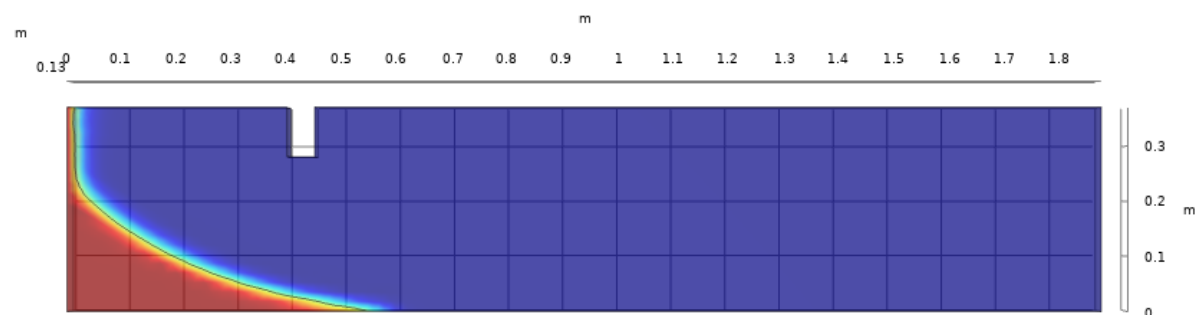
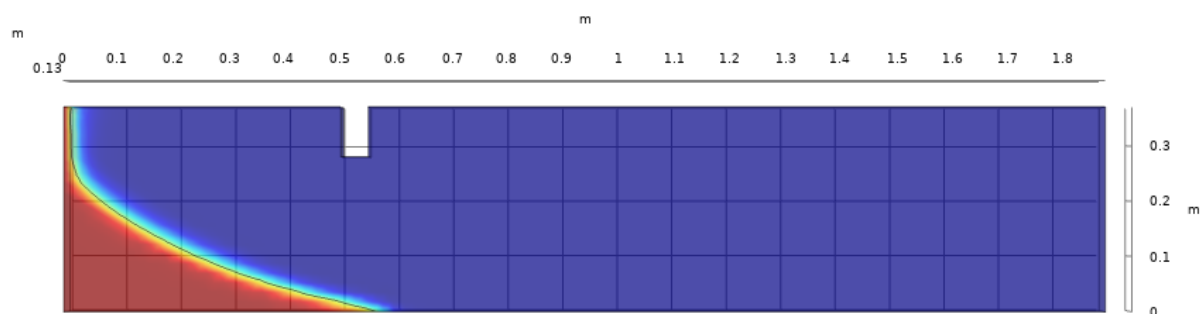
- $t = 600$  min
- $d = 8$  cm
- $h = 41$  cm
- $\Delta x = 10; 20; 30; 40; 50$  cm



Slika 49. Udaljenost kanala od ruba domene  $\Delta x = 10$  cm za vrijeme trajanja  $t = 600$  min

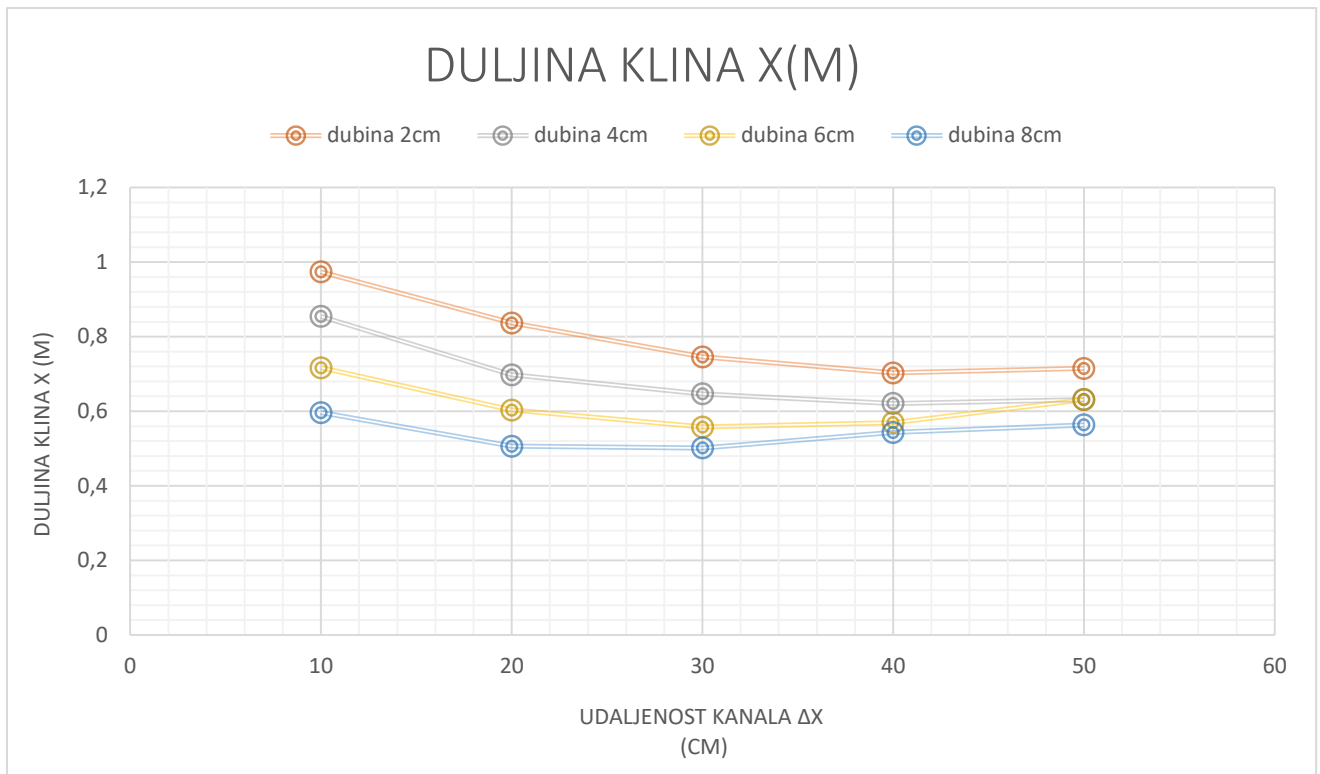


Slika 50. Udaljenost kanala od ruba domene  $\Delta x = 20$  cm za vrijeme trajanja  $t = 600$  min

Slika 51. Udaljenost kanala od ruba domene  $\Delta x = 30$  cm za vrijeme trajanja  $t = 600$  minSlika 52. Udaljenost kanala od ruba domene  $\Delta x = 40$  cm za vrijeme trajanja  $t = 600$  minSlika 53. Udaljenost kanala od ruba domene  $\Delta x = 50$  cm za vrijeme trajanja  $t = 600$  min

#### 6.4.4. Analiza zajedničkog utjecaja udaljenosti i dubine kanala na duljinu klina

Generalno se može zaključiti da se za udaljenosti manje od 30 cm klin smanjuje, a za udaljenosti veće od 30 cm klin se povećava. Razlog tome je to što na većim udaljenostima postoji veći utjecaj dubine kanala. Jasno se vidi i da veća dubina znači manju duljinu prodora klina (Slika 54).



Slika 54. Grafički prikaz ovisnosti dubine kanala i udaljenosti kanala na duljinu klina

## 6.5. Injekcijska zavjesa

Injekcijska zavjesa razmatrana kao treća varijanta rješenja postavlja se neposredno uz lijevi rub domene u debljini 7 cm i na varijabilnoj dubini od površine. Injekcijska zavjesa ima različiti hidraulički konduktivitet  $K = 1.2 \cdot 10^{-6}$  m/s i poroznost  $\varepsilon = 0.38$  od ostatka domene i time sprječava prodor slanog klina.

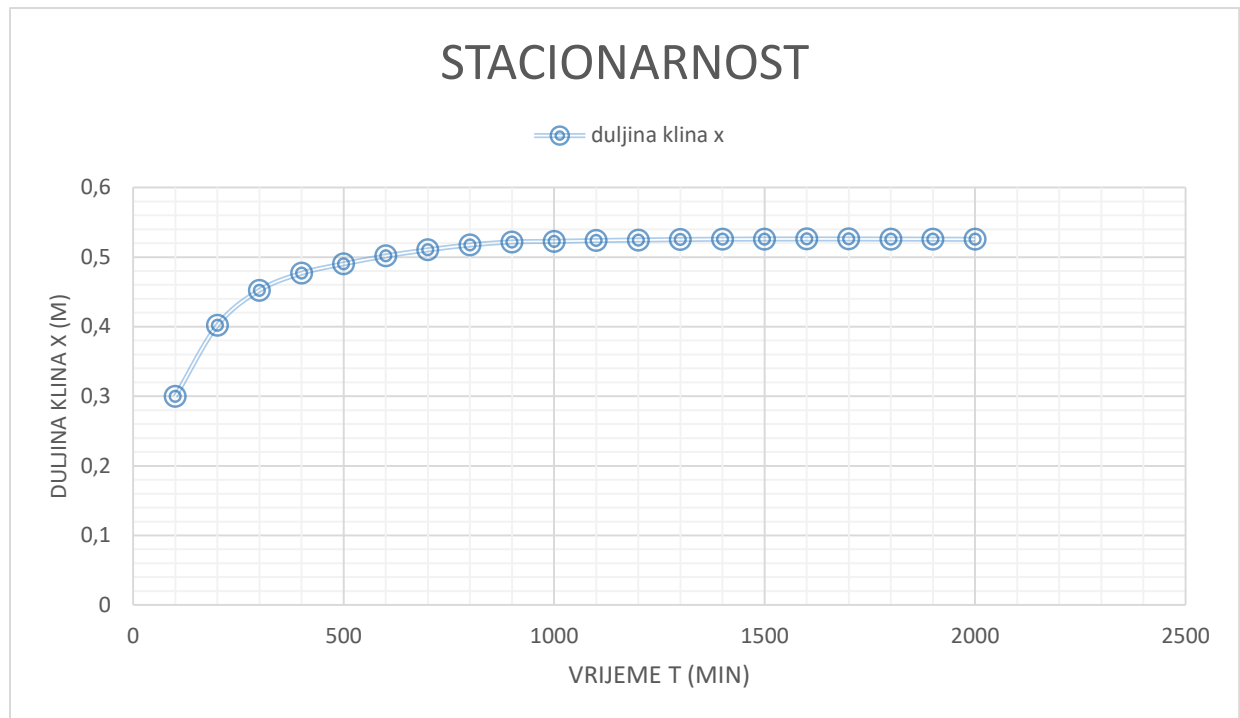
Prilikom pokretanja simulacije sa injekcijskom zavjesom u sučelju programa dodana su svojstva materijala za injekcijsku zavjesu različita od svojstava materijala prethodno zadane domene. Dodavanjem novog sloja tekućine u Darcyjev zakon da bi model konvergirao povećan je maksimalni broj iteracija. Također, stvorio se oblak koncentracije koji je riješen smanjenjem parametra disperzije.

Smanjenjem disperzije bilo je potrebno smanjiti i diskretizaciju pa je maksimalna veličina elementa diskretizacije smanjena sa 0.02 m na 0.015 m. Nakon ovih promjena u odnosu na prethodne simulacije model je konvergirao i dobiveno je odgovarajuće rješenje.

Za postizanje stacionarnosti modela ispitano je vrijeme trajanja simulacije od 0 do 2000 min sa korakom  $\Delta t = 10$  min.

Stacionarnost je postignuta na 1500 min i to vrijeme je uzeto kao mjerodavno za analizu duljine prodora slanog klina (Slika 55).



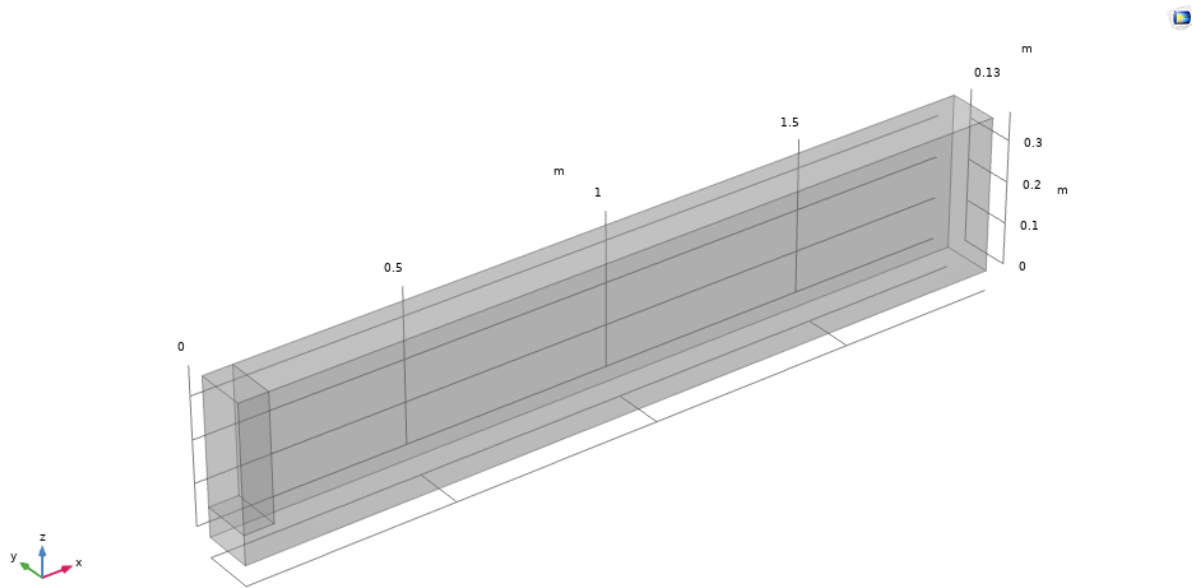


Slika 55. Stacionarnost simulacije injekcijske zavjese na dubini 30 cm od površine

Ovo rješenje ima funkciju usporiti ili potpuno zaustaviti prodor soli kroz zavjesu. Najveći dio klina prođe ispod zavjese, u donjem dijelu domene. Pretpostavka je da što je zavjesa dublje postavljena to je manji prodor klina što će se analizirati u narednim rezultatima.

Zadani parametri:

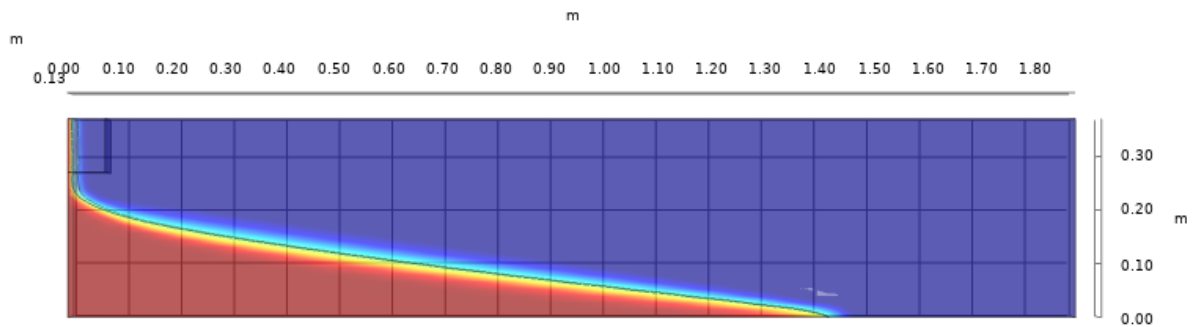
- Debljina injekcijske zavjese  $D = 7$  cm
- Hidraulički konduktivitet materijala injekcijske zavjese  $K = 1.2 \cdot 10^{-6}$  m/s
- Hidraulički konduktivitet materijala domene  $K = 1.21 \cdot 10^{-2}$  m/s
- Poroznost materijala injekcijske zavjese:  $\varepsilon = 0.38$
- Poroznost materijala domene:  $\varepsilon = 0.37$
- Disperzija:
  - Longitudinalna disperzija  $\alpha_L = 0.005$  (m)
  - Transverzalna disperzija  $\alpha_T = 0.0005$  (m)
- Vrijeme trajanja simulacije  $t = 2000$  min
- Dubina od površine varijabilna  $d = 10; 15; 20; 25; 30$  cm



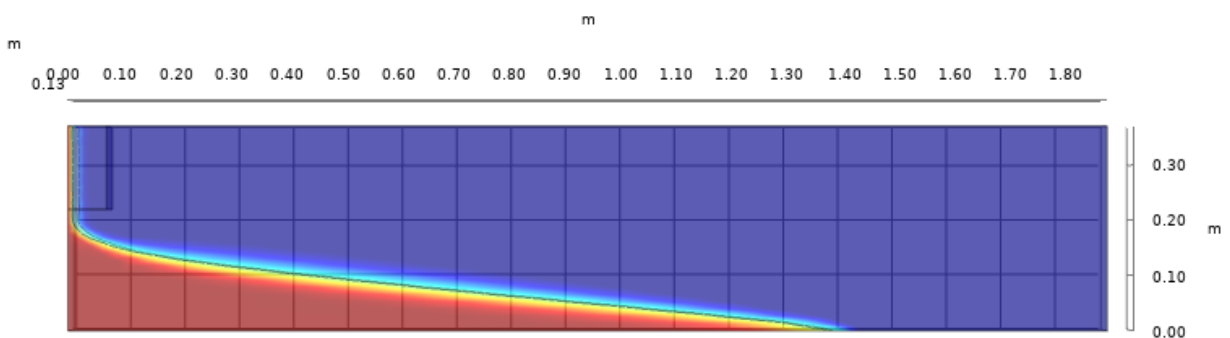
Slika 56. 3D prikaz geometrije injekcijske zavjese

### 6.5.1. Analiza utjecaja dubine injekcijske zavjese od površine na smanjenje klina

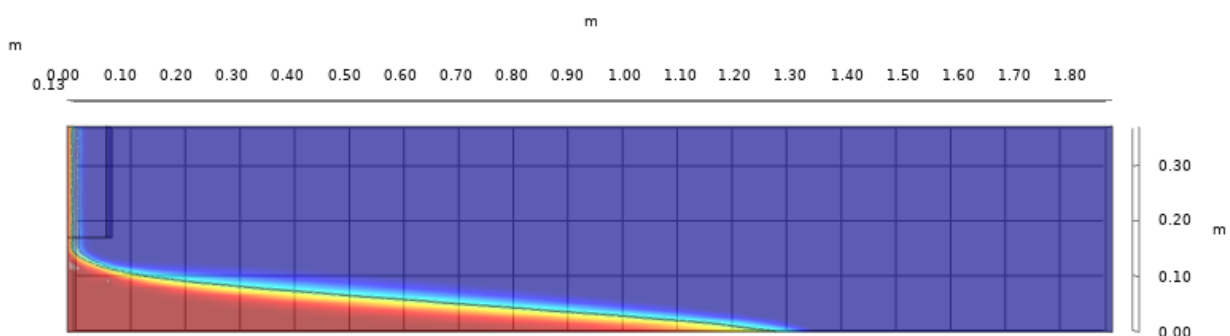
Sljedeće slike prikazuju 5 simulacija modela sa injekcijskom zavjesom na različitim dubinama. Vidljivo je da se povećanjem dubine injekcijske zavjese duljina klina znatno smanjuje. Veza dubine i duljine klina prikazana je i na grafu (Slika 62).



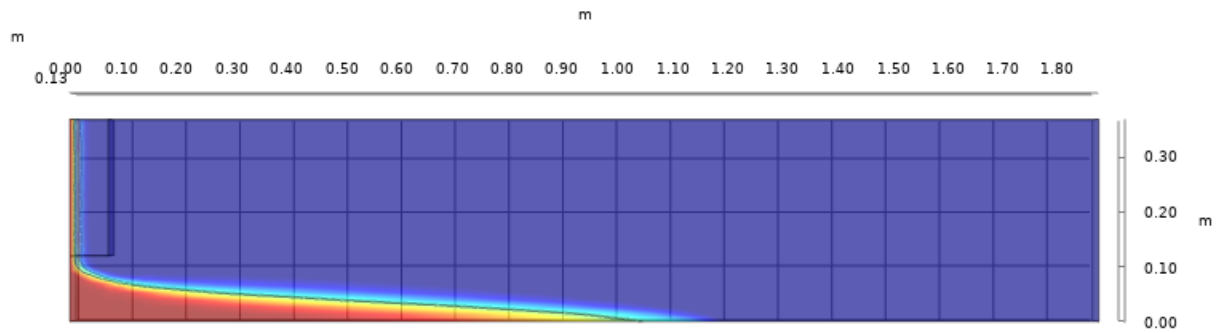
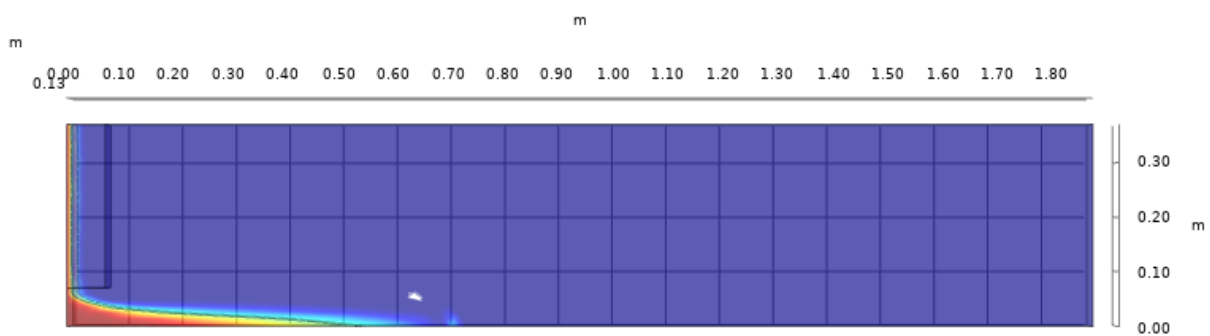
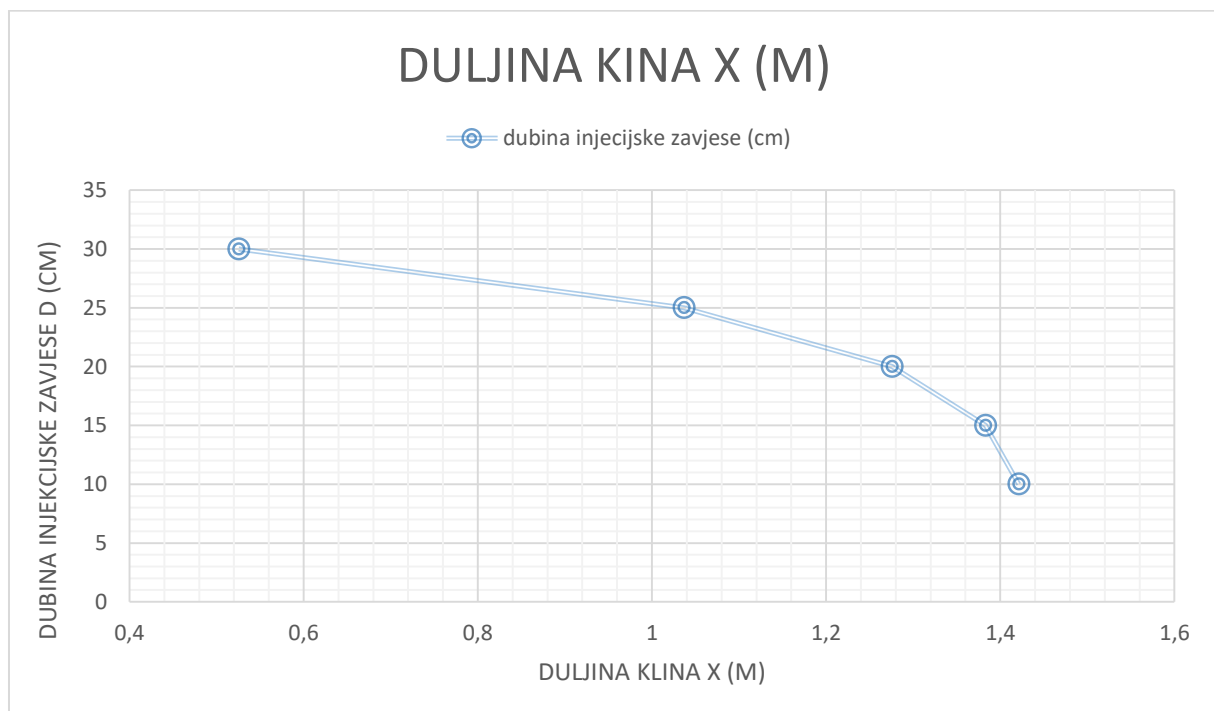
Slika 57. Dubina injekcijske zavjese od površine  $d = 10$  cm za vrijeme trajanja  $t = 2000$  min



Slika 58. Dubina injekcijske zavjese od površine  $d = 15$  cm za vrijeme trajanja  $t = 2000$  min



Slika 59. Dubina injekcijske zavjese od površine  $d = 20$  cm za vrijeme trajanja  $t = 2000$  min

Slika 60. Dubina injekcijske zavjese od površine  $d = 25$  cm za vrijeme trajanja  $t = 2000$  minSlika 61. Dubina injekcijske zavjese od površine  $d = 30$  cm za vrijeme trajanja  $t = 2000$  min

Slika 62. Grafički prikaz ovisnosti dubine injekcijske zavjese na duljinu klina

## 7. RASPRAVA

### 7.1. Valorizacija triju rješenja

Mjere zaštite provedene su u softverskom programu i analizirana su rješenja tekstualno i grafički. Kalibracijom parametara koji su ključni u smanjenju intruzije napravljeno je više simulacija sa različitim kombinacijama.

Kod prve mjere zaštite, zdenca za crpljenje, pokrenuto je i izračunato ukupno 23 simulacije. Simulacije sa promjenom dubine crpljenja, udaljenosti zdenca od ruba i količinom crpljenja, zatim i kombinacije promjene dubine i udaljenosti. Količina crpljenja ima velik utjecaj na smanjenje klina, ali kod količine crpljenja veliku ulogu imaju i ekonomski razlozi pa je optimalnije rješenje sa povećanjem dubine crpljenja koje također ima pozitivan utjecaj na smanjenje klina. Što se tiče udaljenosti od morskog rubnog uvjeta, niti u funkcionalnom niti u ekonomskom pogledu ne utječe značajno tako da se kod parametra udaljenosti  $\Delta x$  definitivno može usvojiti najveća udaljenost tj.  $\Delta x = 50$  cm koja daje najmanju duljinu klina. Za malo manju dubinu crpljenja  $d = 30$  cm može se vidjeti da nema velike razlike u rezultatu u odnosu na dubinu  $d = 35$  cm, a ako se uzme u obzir težina izvodljivosti i ekonomičnost razlika je značajnija. Za dubinu  $d = 30$  cm, udaljenost  $\Delta x = 50$  cm i optimalnu brzinu kojom se crpi  $v = 0.01$  m/s duljina klina je  $x = 1.0529$  m dok je *najmanja duljina klina*, uz istu brzinu, na dubini  $d = 35$  cm, udaljenosti  $\Delta x = 50$  cm i iznosi  $x = 0.94629$  m. Ovo rješenje je u tehničkom smislu pouzdano, ali u pogledu složenosti, brzine izvedbe i troška zdenca za crpljenje spada u nepovoljnije rješenje. Pri izvedbi, bušenje i zacjevljenje, troškovi su veliki, radi se na velikim dubinama. Također, prilikom korištenja treba uzeti u obzir pumpe koje stalno rade što je veliki trošak kao i održavanje strojeva tokom cijele uporabe.

Pokrenute su 23 simulacije druge mjere zaštite sa kanalom za infiltraciju. Mijenjani parametri dubine kanala, udaljenosti kanala od ruba, razine vode u kanalu i kombinacije promjene dubine i udaljenosti kao i kod zdenca. Za kanal u kojem je razina vode  $h = 42$  cm, dubina kanala  $d = 8$  cm i udaljenost  $\Delta x = 10$  cm dobije se *najmanja duljina klina* koja iznosi  $x = 0.01358$  m. Radi lakše izvodljivosti bolje rješenje bilo bi kombinacija sa razinom vode  $h = 41$  cm, dubina kanala  $d = 8$  cm i udaljenost  $\Delta x = 10$  cm. U tom slučaju duljina klina za vrijeme trajanja od  $t = 2000$  min iznosi  $x = 0.50175$  m. U pogledu učinkovitosti i tehničke pouzdanosti kanal daje najmanju duljinu klina i prema tome je najbolji izbor. Izvedba kanala ne predstavlja

problem jer se ne radi na velikoj dubini, kanal je na površini. U prilog izradi kanala idu i budući projekti za dolinu Neretve koji uključuju gradnju pregrade čime se stvara uspor u rijeci, time dolazi do povećanja gornje vode što znatno olakšava izvedbu kanala jer se kanal može spojiti na gornju kotu vode i automatski se osigurava tlak u kanalu veći nego u rijeci. Zaključak je da je i izvedba i trošak u rješenju sa kanalom prihvatljiv.

Injekcijska zavjesa ima varijabilnu samo dubinu, izračunato je 5 simulacija sa promjenom dubine injekcijske zavjese. Injekcijska zavjesa je pokazana kao jako dobro rješenje kod smanjenja prodora slanog klina. Zavjesa je debljine 7 cm i postavljena je uz lijevi rub domene. Postavljanjem injekcijske zavjese na dubinu  $d = 30$  cm od površine domene postiže se najmanja duljina klina  $x = 0.5225556$  m. Iako dobro rješenje u funkcionalnom i tehničkom smislu, izvedba i trošak ne daju pozitivan ishod. Pri izvedbi potrebno je na velikoj dubini bušenje, injektiranje i ostali radovi što zahtjeva i vrijeme i novac.

Prema učinkovitosti i ekonomičnosti odabrano je rješenje sa kanalom za infiltraciju čiste vode.

## 8. ZAKLJUČAK

Izbor rješenja je jako složena zadaća jer zahtijeva cjelokupno uređenje i gospodarenje područjem donje Neretve. Procesi zaslanjenja vodotoka na riječnim ušćima ubrajaju se u složene dinamičke i stohastičke procese [5].

Pokretanjem simulacija modela analizirane su tri varijante rješenja za smanjenje prodora morske vode u ušće rijeke Neretve:

- Zdenac za crpljenje
- Kanal za navodnjavanje
- Injekcijska zavjesa

Zaključci:

- U pogledu funkcionalnosti ključan parametar za izbor rješenja je duljina klina  $x$  i u tom slučaju najbolje rješenje daje kanal za navodnjavanje ( $x = 0.50175 m$ ).
- Zdenac za crpljenje i injekcijska zavjesa daju tehnički dobra rješenja, ali po težini izvodljivosti spadaju u teško izvediva rješenja.
- Rješenje s kanalom najpovoljnije je i što se tiče izvođenja

Preporuka:

U konačnici, provedenom analizom predlaže se primjena rješenja s kanalom za infiltraciju vode u vodonosnik kao najprikladnija mjera zaštite od djelovanja morske vode, kako u funkcionalnosti tako i u složenosti, izvodljivosti i ekonomičnosti.

Usvojeni parametri kanala su:

- Udaljenost kanala od ruba  $\Delta x = 10$  cm
- Dubina kanala  $d = 8$  cm
- Razina vode u kanalu  $h = 41$  cm

Izborom kanala za infiltraciju stvara se mogućnost izrade cijelog projekta za navodnjavanje što je velik posao i šansa za poboljšanje poljoprivrede. Suvremena, stabilna i konkurentna poljoprivredna proizvodnja od velike je važnosti za razvoj ruralnih područja, ali i cijele Hrvatske.

### III. Literatura:

- [1] *Vranješ, M. i suradnici: Obrana od zaslanjivanja vode i tla u donjoj Neretvi, Razvojni projekt, Građevinski fakultet Split i Hrvatske vode, 1995-2004.*
- [2] *Christodoulou, G.C.: Interfacial mixing in stratified flows, Journal of Hydraulic Research, Vol. 24, 77-91, 1986.*
- [3] *Veljko Srzić, Ivan Lovrinović, Petra Krnić, Liangchao Zou, Vladimir Divić, Krešimir Vranješ, Iva Matic: Modelling seawater intrusion in coastal aquifers under laboratory conditions, AGGU FALL MEETING, Online Everywhere, 1 – 17 December 2020.*
- [4] *The Multiphysics Cyclopedia, Fluid Flow: Conservation of Momentum, Mass, and Energy, June 29, 2018.*
- [5] *Izv.prof.dr.sc. Mijo Vranješ, Prof.dr.sc. Davor Romić: PREGRADIVANJE RIJEKE NERETVE, Rad objavljen na 5. hrvatskoj konferenciji o vodama, Opatija 18. - 21. svibnja 2011, Broj 3 lipanj, 2012.*