

Istraživački projekti
(šifra natječaja: IP-2020-02)

Prijavni obrazac¹

Puni naziv projektnoga prijedloga
Multifizikalno modeliranje površinskih i podzemnih voda

AKRONIM PROJEKTOGA PRIJEDLOGA
Multi-Waters

Molimo poštovati sljedeća ograničenja oblikovanja teksta: font OpenSans ili Arial, veličina fonta najmanje 10, margine (2.0 desna i lijeva i 1.5 donja), jednostruki prored.

Prijavni obrazac se sastoji od tri cjeline:

- Cjelina A – Predlagatelj projektnoga prijedloga ([stranice 1 - 3](#))
- Cjelina B – Projektni prijedlog ([stranice 4 – 15](#))
- Cjelina C – Istraživačka grupa
- Reference

Naslovna stranica:

- Ime i prezime predlagatelja projektnoga prijedloga – prof.dr.sc. Hrvoje Gotovac
- Ime znanstvene organizacije na kojoj će se provoditi projekt – Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
- Puni naziv projektnoga prijedloga - Multifizikalno modeliranje površinskih i podzemnih voda
- Trajanje projekta (u mjesecima) – 48 mjeseci

¹ Upute za ispunjavanje prijavnoga obrasca mogu se pronaći u Uputama za podnositelje projektnih prijedloga za natječaj.

Cjelina A – Predlagatelj projektnoga prijedloga

Dio a: Popis postignuća (Track-record) predlagatelja projektnoga prijedloga u posljednjih 5 godina (najviše 1 stranica), uključujući:

1. *Pet publikacija: radovi u međunarodnim recenziranim znanstvenim časopisima uz pripadajuću poveznicu na postupak istražinskog vrednovanja časopisa, poglavlja u knjigama, radovi s konferencija, monografije, itd.*

1. Luka Malenica, Hrvoje Gotovac, Grgo Kamber, Srdjan Simunovic, Srikanth Allu, Vladimir Divić; Groundwater flow modeling in karst aquifers: Coupling 3D matrix and 1D conduit flow via control volume isogeometric analysis - experimental verification on 3D physical model, *Water*, (2018), 10(12), 1787; <https://doi.org/10.3390/w10121787>.

2. Galešić, Morena; Andričević, Roko; Gotovac, Hrvoje; Srzić, Veljko. Concentration statistics of solute transport for the near field zone of an estuary. // *Advances in water resources*. 94 (2016); 424-440.

3. Fiori, Aldo; Zarlenga, Alberto; Gotovac, Hrvoje; Janković, Igor; Volpi, Elena; Cvetković, Vladimir; Dagan, Gedeon. Advective transport in heterogeneous aquifers: Are proxy models predictive? // *Water resources research*. 51 (2015), 12; 9577-9594.

4. Cvetković, Vladimir; Gotovac, Hrvoje. On the upscaling of chemical transport in fractured rock. // *Water resources research*. 50 (2014), 7; 5797-5816.

5. Kamber, Grgo; Gotovac, Hrvoje; Kozulić, Vedrana; Malenica, Luka; Gotovac, Blaž. Adaptive isogeometric analysis based on truncated hierarchical basis functions // *Book of Abstracts of the 9th International Congress of Croatian Society of Mechanics*, Split, Hrvatska, (2018), str. 103-112.

2. *Popis projekata (navedite financirane i projektne prijedloge prijavljene na ovaj ili druge izvore financiranja na kojima ste voditelj ili suradnik. Navedite izvor financiranja, uloga na projektu (voditelj/suradnik) tražena ili dodijeljena sredstva, naslov projekta. Dodajte poveznice na mrežne stranice financiranih projekata.)*

1. „Monitoring Sea-water intrusion in coastal aquifers and Testing pilot projects for its mitigation“, Researcher/Team member, (total 600 000 Euro): 2019-2022, Interreg IPA project.

2. Interreg CBC Hrvatska-Italija: AdSWiM – Management and treatment of urban wastewater to preserve the quality of the Adriatic coastal area, Hr/Upravljanje i pročišćavanje otpadnih voda urbanih sredina za očuvanje kvalitete obalnog područja Jadranskog mora, Researcher/Team member, (2019-2021).

3. Interreg CBC Hrvatska-Italija: NET4mPLASTIC – New technologies for detection micro and macro plastic on coastal region of Adriatic sea, Hr/ Nove tehnologije za detekciju makro i mikro plastike na obalnom području Jadranskog mora, Researcher/Team member, (2019-2021).

3. *Dosadašnje sudjelovanje na projektima HRZZ-a (uloga na projektu (voditelj/suradnik), najvažnije publikacije proizašle s tog projekta i najvažnije rezultate)*

„Groundwater flow modeling in karst aquifers“, Hrvatska Zaklada za Znanost, HRZZ, ukupno 958.000,00 HRK; UIP-2013-8103, voditelj projekta.

2 publikacije u časopisima (Malenica et al., 2018, Kozulic and Gotovac, 2017), 6 konferencijskih publikacija, 1 doktorska disertacija (Malenica, 2019).

Svi rezultati projekta predstavljeni su u doktorskom radu Malenice (2019). Glavni rezultat je krški protočni model i njegova provjera u laboratorijski kontroliranim uvjetima dizajniranim u 3-D bazenu s pijeskom (Malenica i sur., 2018). Dodatni rezultat projekta bio je razvoj adaptivne metode multirezolucije temeljene na novim hijerarhijskim Fup baznim funkcijama i CV-IGA (početni 1-D rezultati prikazani su u Kamber i sur., 2018). U fazi jednogodišnjeg projekta, tri su rada trenutno u posljednjoj fazi postupka recenziranja.

4. *Pozvana predavanja na međunarodnim konferencijama i/ili ljetnim školama*

Acex-2018, *Engineering modelling with spline based numerical methods*, Amsterdam, Holland.

5. *Ostala važna akademska postignuća: organizacija znanstvenih sastanaka (201? naziv događaja i Vaša uloga /vrsta sastanka/broj sudionika/država), međunarodna priznanja, članstva u uredništvima časopisa, dulja usavršavanja, recenziranje članaka za međunarodne časopise, usavršavanja na inozemnim ustanovama, najvažnije znanstvene suradnje (imena suradnika, tema, ustanova, grad, država; primjena rezultata)*

Urednički odbor u časopisu „*International Journal of Engineering modelling*“, Obuka u Nacionalnom laboratoriju Oak Ridge, dva puta po jedan mjesec (2016. i 2017.), međunarodna recenzija u *Water Resources research*, *Advances in Water Resources*, *Water*, *Geologica Croatica*,....

Suradnja s Vladimirom Cvetkovićem, Aldom Fiorijem, Gedeonom Daganom, Igorom Jankovićem, Srdanom Šimunovićem.

Erasmus suradnja s Ramirom Nevesom, Sveučilište u Lisabonu, 2019. godine.

Dio b: Životopis predlagatelja projektnog prijedloga (najviše 2 stranice, prema sljedećem predlošku)**OSOBNJE INFORMACIJE**

Prezime i ime: Gotovac Hrvoje

Matični broj istraživača: 244885

Mrežna stranica: <http://gradst.unist.hr/o-fakultetu/adresar-imenik/agenttype/view/propertyid/1804>

OBRAZOVANJE

2009 - PhD

Organizacija: Royal Institute of Technology, KTH, Department of Land and Water resources, Stockholm (Sweden)

2005 – Magistar znanosti

Organizacija: Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Split (Hrvatska)

1999 – Prvostupnik

Organizacija: Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Split (Hrvatska)

Zaposlenje

2019– 2020 – Redoviti profesor

Organizacija: Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Split (Hrvatska)

Prethodna zaposlenja

2000 – 2019 Od doktoranda i asistenta do izvanrednog profesora

Organizacija: Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Split (Hrvatska)

MENTORSTVA DOKTORSKIH STUDENATA I POSLIJEDOKTORANDA

2010 – 2020 24 diplomanta/2 obranjene doktorske disertacije/1 nadgledana postdoktorska istraživanja:

Organizacija: Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Split (Hrvatska)

NASTAVNE AKTIVNOSTI

2010 – 2020 – PODRUČJE: Tehničke znanosti: Predmeti: Hidrotehničke građevine, Modeliranje tok i pronosa u podzemlju

Organizacija: Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Split (Hrvatska), Fakultet geotehničkog inženjerstva, Sveučilište u Zagrebu

OBVEZE U ORGANIZACIJI (ako je primjenjivo)

2010-2018 – prodekan za znanost

2016-2020- Voditelj hidrotehničkog laboratorija

ČLANSTVA (primjerice: znanstvena povjerenstva ili udruženja, odbori za vrednovanje, uredništva časopisa i sl.; navesti godinu i ustanovu.) (ako je primjenjivo)

American Geophysical union

European Geophysical union

Croatian Society of mechanics

Member of Editorial Board of „Journal of Engineering Modelling“

NAJVAŽNIJE ZNANSTVENE SURADNJE

Imena suradnika, Tema, Organizacija, Grad, Država

1. Royal Institute of Technology, Department of Land and Water Resources, KTH, Stockholm, Sweden. (Profesor Vladimir Cvetkovic), subsurface flow and transport, PhD, SKB projects, zajednički radovi.

2. Stockholm University, Sweden. (Professor Georgia Destouni), saltwater intrusion in coastal aquifers, FP5 project.

3. Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA. (Istraživač Srđan Šimunović), HRZZ projekt.

4. Dipartimento di Ingegneria, Università di Roma Tre, Rome, Italy. (Professor Aldo Fiori), subsurface flow and transport, zajednički radovi.

5. Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, State University of New York at Buffalo, Buffalo, New York, USA. (Profesor Igor Janković), subsurface flow and transport, zajednički radovi.

6. Geotehnički fakultet u Varaždinu, Sveučilište u Zagrebu. (Profesor Bojan Đurin), stručna suradnja na projektu.

7. Građevinski fakultet u Zagrebu, Sveučilište u Zagrebu. (Profesor Goran Lončar), stručna suradnja na projektu.

8. Građevinski fakultet u Rijeci, Sveučilište u Rijeci. (Professor Vanja Travaš), stručna suradnja na projektu.

9. Hrvatske Vode (Inženjer Ivica Jurčević), stručna suradnja na projektu, suradnja na HRZZ projektu

10. CEMEX (Engineer Kajo Ferić), stručna suradnja na projektu.

Cjelina B – Projektni prijedlog

Dio a. Trenutno stanje u području istraživanja (*opišite trenutno stanje u području istraživanja, istaknite najvažnije publikacije.*)

Multifizika se odnosi na probleme koji spajaju više fizikalnih pojava. Brown i sur. (2008) tvrde da budućnost znanosti snažno ovisi o sljedećoj tvrdnji: „Današnji problemi, za razliku od tradicionalnih znanosti i inženjerstva, ne uključuju fizikalne procese obuhvaćene jedinstvenom tradicionalnom disciplinom fizike ili pripadajućom matematikom. Složeni sustavi koji se susreću u gotovo svim aplikacijama od interesa uključuju mnogo različitih fizikalnih procesa. Pitanje povezivanja različitih događaja na različitim skalama i upravljano različitim fizikalnim zakonima uglavnom je široko otvoreno i predstavlja ogromno izazovno područje za buduća istraživanja. ”

Semantički, multifizikalni sustav sastoji se od više komponenti upravljanih vlastitim principima ravnoteže, obično zakonima očuvanja ili konstitutivnim zakonima (Keyes i sur., 2013.). Glavna klasifikacija u takvim sustavima je da li se spajanje-interakcija događa skupno (npr. konstitutivnim odnosima koji su aktivni u preklapajućim domenama pojedinih komponenata) ili se događa preko idealiziranog sučelja koje je niže dimenzionalno ili uska tranzicijska zona (npr. preko rubnih uvjeta koji prenose protoke, pritiske ili pomake). Tipični primjeri multifizikalnih sustava na velikoj skali su npr. zračenje s hidrodinamikom astrofizike (radijacijsko-hidrodinamika ili „rad-hidro”), električna energija i magnetizam s hidrodinamikom u fizici plazme (magnetohidrodinamika) i kemijske reakcije s transportom u izgaranju ili podzemnim tokovima (reaktivni transport). Iza ovih klasičnih sustava „Multiphysics“ postoje i mnogi drugi koji imaju važna strukturna obilježja (Keyes i sur., 2013.).

Sustavi parcijalnih diferencijalnih jednadžbi (PDE) različitih tipova (npr. Eliptično-parabolični, eliptični-hiperbolički ili parabolički-hiperbolički) za istu komponentu mogu se smatrati multifizikom, jer svaki od klasičnih arhetipa djelomičnih diferencijalnih jednadžbi predstavlja različite fizikalne fenomene. Čak i jedna jednadžba s pojmovima različitih vrsta predstavlja multifizički model, jer se svaki termin mora obraditi zasebnim metodama diskretizacije ili rješavanja. Neke tipične primjene multifizike velikih PDE su interakcija fluid-struktura, performanse goriva u reaktoru fisije, modeliranje jezgre reaktora, širenje pukotina, fuzija, tečenje i pronos u vodnim sustavima, hidrologija, klima, hidrodinamika zračenja, geodinamika i dinamika magme ili dizajn akceleratora (Keyes i sur., 2013.).

U ovom ćemo se projektu koncentrirati na kompleksne sustave tipa „Multiphysics-fluid“ gdje se barem jedna komponenta sastoji od tekuće faze u poroznim medijima. Posebno ćemo uzeti u obzir Multifiziku sustava površinskih i podzemnih voda (SSWS).

Nacrt za modeliranje potpuno integriranih hidroloških procesa površinskog otjecanja, tečenja u kanalima i rijekama povezano s podzemnim tokovima, izvorno je predložen prije četrdeset godina (Freeze i Harlen, 1969), a sada postaje stvarnost. Iako se uistinu multifizikalni modeli pojavili tek nedavno u literaturi (npr. VanderKwaak i League, 2001; Kollet i Maxwell, 2008), rastuća baza modela i zajednica modelara-istraživača uvelike pridonose našem razumijevanju spregnutih hidroloških i energetskih ciklusa. Ovi spojeni i integrirani hidrološki modeli se koriste u raznim važnim pitanjima. Modeli imaju zajedničke značajke po tome što rješavaju neki oblik nelinearne jednadžbe difuzije (npr. Richards) za podzemni protok vode i neki jednostavniji oblik jednadžbi St. Venetove jednadžbe (obično difuznog vala) za površinsko tečenje. Uz to se ti hidrološki modeli spajaju s modelima energije kopnene površine, bio-geo-kemije / ekologije i atmosferskim modelima. Razvijene numeričke i računske tehnologije dijelom su omogućile nove pristupe za modeliranje ovih povezanih interakcija. Iako svi ovi modeli imaju različite numeričke, diskretizacijske i interakcijske pristupe, dijele zajednički cilj modeliranja - rigorozno i matematički - hidrološki i energetski ciklus kao integrirani sustav. Istraživanje koje se bavi ovim pitanjima obuhvaća niz skala i uključuje razne procese. Hidrološki modeli simulacije raščlanjuju se u dvije široke kategorije rješenja: globalno implicitna formulacija i metode separacije operatora. Među globalno implicitnim hidrološkim modelima postoje dvije različite formulacije za rješenje površinskog i podzemnog toka: razmjena prvog reda [VanderKwaak i League, 2001] i kontinuitet tlaka [Kollet i Maxwell, 2008]. Stanje tehnike spomenutog multifizičkog modeliranja pokazuje da povezani površinsko-podzemni procesi zahtijevaju potrebu za višestrukim fizikalnim formulacijama za različite Multifizikalne komponente, pažljivo osmišljene strategije spajanja komponenti Multifizike, potrebe za novim naprednim numeričkim tehnikama, računanje numeričkih i/ili stohastičkih simulacija velikih razmjera s ogromnim brojem nepoznatih stupnjeva slobode (poput tlaka, brzine, koncentracije, temperature, pomaka itd.) u prostornoj i vremenskoj domeni, uključujući visoko paralelno računanje (HPC) i prilagodljive multirezolucije i/ili efikasne metode s više skala i algoritama. Posebno je pitanje izbor i razvoj softvera za „Multiphysics „jer se povijesno radilo odvojeno za različite komponente „Multiphysics“ unutar njegovih disciplina. Završno je pitanje provjera i potvrda softvera zbog njegove složenosti i višestrukih struktura, nepostojanja analitičkih ili eksperimentalnih kontrolnih rješenja i opsežnih zahtjeva podataka o mjerenjima na terenu (na primjer, u hidrološkim modelima oborina, hidrauličkih parametara tla, brzina i tlaka podzemne vode, riječni protok i razine, koncentracije zagađenja itd.). U nastavku ćemo pokušati predstaviti kako su ta ključna pitanja riješena i analizirana u pristupu „state of art“.

Danas su površinski i podzemni tokovi i transportni procesi opisani 1-D površinskim tokom opisuje protok u kanalima, rijekama ili krškim dubokim provodnicima. 2-D površinski tok opisuje protok otjecanja preko gornje površine domene ili kroz pukotine u frakturiranom (karstificiranom) poroznom mediju (de Rooij, 2013). Matematički model podzemnog toka opisuje Richardsova nelinearna jednačba koja prikazuje uvjete nezasićenih strujanja. Matematički model površinskog toka opisan je St. Venantovim jednačbama ili obično njegovom jednostavnijom verzijom koristeći nelinearnu difuzijsku jednačbu difuznih valova (Malenica, 2019) koja može opisati laminarni i turbulentni protok, kao i protok pod tlakom ili slobodnim vodnim licem. Prijenos mase i energije u obje domene opisan je dobro poznatom adektivno-disperzijskom jednačbom (de Rooij, 2013).

Pristupi s više domena zahtijevaju povezivanje kontinuiranih i/ili diskretnih modela u prostoru i vremenu. Ova veza mora poštovati matematičku formulaciju povezanog problema i mora uzeti u obzir različite prostorne mreže i vremenske diskretizacije koje se koriste u svakoj domeni. Na primjer, problemi s površinskim i podzemnim spjanjem-interakcijom 3-D toka porozne matrice i obično 1-D površinski tok u otvorenim kanalima, rijekama ili krškim kanalima, spajanje se često realizira razmjenom fluksa prvog reda u obliku [$q_{ex} = \alpha_{ex}(h_s - h_m)$] ovisno o razlici između piezometarske visine u obje domene i parametru izmjene koji je obično konstantan, dobiven postupkom kalibracije i stoga fizikalno neutemeljen jer se ne može mjeriti (pogledajte naše najnovije rezultate za interakcije površinskog i podzemnog toka u krškim vodonosnicima, Malenica i dr., 2018).

Stoga je potrebna posebna zasebna diskretizacija u površinskoj i podzemnoj domeni, ali i na spoju domena gdje se odvija razmjena flukseva. Putti i Paniconi (2015) iznijeli su cjelokupni pregled o modeliranju u sustavima površinskih i podzemnih voda, a posebno ističu nefizikalnu ulogu spomenutog parametra izmjene.

Drugo je pitanje izbora numeričke tehnike za sustave površinskih i podzemnih voda. Cainelli i sur. (2012) nedavno su analizirali svojstva konvergencije i aproksimacije uobičajenih numeričkih metoda za analizu protoka i transporta u heterogenim poroznim medijima. Oni su definirali uobičajene metode kao metode konačnih elemenata (FEM) i metode konačnih volumena (FVM). Klasična metoda konačnih elemenata (FEM) (npr. Bellin i sur., 1992.) dijeli domenu na konačne elemente koji opisuju nepoznatu varijablu kao linearnu kombinaciju klasičnih Lagrangijevih baznih funkcija (obično linearne ili kvadratne). Problem s klasičnim FEM metodama je diskontinuitet gradijenta duž granica među elementima zbog svojstava osnovnih funkcija Lagrangian. Ovaj učinak, u kombinaciji s uobičajenom pretpostavkom o diskontinuiranom polju vodljivosti kroz Darcyjev zakon, stvara numeričke „nefizikalne“ brzinske diskontinuitete (varijacije) uzrokujući dodatnu umjetnu numeričku disperziju i na primjer netočno praćenje čestica u transportnim simulacijama.

Klasični FEM također može narušiti lokalni kontinuitet mase na kon. elementima. Prvi način za prevladavanje klasičnih problema s FEM-om je upotreba mješovite formulacije konačnih elemenata (npr. Mose i sur. 1994.), gdje je brzina također predstavljena osnovnim funkcijama koje uključuju dodatne stupnjeve slobode i računski rad u simulacijama toka. Uz to, neke MFE formulacije mogu stvoriti loše postavljene probleme. Drugi način je izvršiti postprocesorske proračune na poljima brzine FEM koja zahtijevaju kontinuitet brzina između elemenata i/ili nastavak mase (Yeh i sur., 1981; Cordes i Kinzelbach, 1992).

S druge strane, FVM metode, poput MODFLOW formulacije [npr. Harbaugh, 2005; također se može smatrati formulacijom konačnih razlika u stanicama], zadovoljiti ravnotežu mase preko granica ćelija i osigurati nastavak brzine normalan do rubnih ćelija. Međutim, MODFLOW stvara diskontinuitete komponenata tangencijalne brzine između ćelija. Moguće je dokazati ekvivalenciju između MODFLOW-a i MFE-a koji koristi bazične funkcije niskog reda (Canielli i sur., 2012).

Gotovac i sur. (2009a) predstavio je takav višerezolucijski pristup zasnovan na metodi Adaptive Fup Collocation (AFCM) sa sljedećim ključnim svojstvima: a) korelirano log-vodljivost ($\ln K$) polje je predstavljeno kao kontinuirana funkcija na način koji omogućava višestruko razlučivanje i može točno opisati sve potrebne skale, b) samostalno rješava sve heterogenosti i skale glava, c) daje polje kontinuirane brzine kao i njegove derivacije potrebne za primjenu na realistične transportne simulacije s dispenzijskim tenzorom o brzini i d) aktivno kontrolira numeričke pogreške glave i brzine smanjujući numeričku disperziju i osiguravanje konvergencije, čak i u visoko heterogenim poroznim medijima. Ključ metodologije leži u Fup baznim funkcijama (usko povezanim s B-splineovima, vidi Gotovac i Kozulic, 1999) u kombinaciji s postupkom kolokacije. Međutim, glavni nedostatak bio je nedostatak lokalne i globalne masene ravnoteže zbog svojstava metode kolokacije, nemogućnost opisivanja opće nepravilne geometrije i računalno skupo rješenje glave za dobivanje točnog polja brzina bez numeričkih oscilacija za slučajeve visoke heterogenosti. Između ostalog, primjene AFCM-a prikazane su za analizu protoka i transporta u heterogenim poroznim medijima koji se odnose na statistiku vremena putovanja (Gotovac i sur., 2009b), statistiku koncentracije (Srzić i sur., 2013.) i advektivni transport (Fiori i sur., 2015).

Stoga smo u ovom projektu poželjna AFCM svojstva stavili u širi kontekst izogeometrijske analize (IGA). U početku su ih objavili Hughes i sur. (2005), IGA je privukla ogromnu pažnju dizajnera i modelara jer premošćuje jaz između CAD (Computational Aid Design) nepravilnih domena i numeričkog opisa fizičkih procesa na njima. Ideja je prilično jednostavna: koristiti istu vrstu osnovnih baza (u pravilu B-spline ili NURBS) za opisivanje geometrije i rješenja (tlaka i brzina za naš određeni problem protoka podzemne vode). IGA se uspješno primjenjuje u mnogim područjima mehanike krutih, strukturnih i fluida (npr. Cottrell, Hughes i Bazilevs, 2009). Pokazano je da IGA značajno nadmašuje

klasični FEM zbog veće preciznosti i povećanog kontinuiteta. Budući da klasični IGA koristi Galerkinov princip varijacije za opis rješenja i pretvara fizičku domenu u virtualnu za opis geometrije, očigledna sličnost IGA i FEM rezultirala je time da je znanstvena zajednica široko prihvatila IGA kao novu snažnu mašineriju (spline FEM).

U tom duhu, IGA je usko povezana sa bezmrežnim metodologijama zato što koristi bazne funkcije koje omogućuju mnoga svojstva koja se ne vide u FEM-u, poput točnog opisa geometrije u CAD smislu, bez klasičnog mrežnog povezivanja, učinkovitijeg prilagodljivog prilagođavanja procedura i višeresolucijski pristup, veći kontinuitet rješenja i geometrija i uporaba osnovnih funkcija višeg reda. Osim Galerkinove slabe formulacije, IGA je nedavno predstavila kolokacijski pristup (npr. Aurichio i sur., 2010; Shillinger i sur., 2013; Gomez i De Lorenzis, 2016). Nedavno je naša numerička grupa razvila i primijenila formulaciju kontrolnih volumena u konceptu IGA za modeliranje ptoka podzemne vode u krškim vodonosnicima koji su predstavljeni pomoću 3-D heterogene porozne matrice i 1-D laminarnih/turbulentnih krških vodovoda (Malenica i sur., 2018).

Gore navedeni multifizikalni-fluid problemi zahtijevaju velike trodimenzionalne simulacije i visoko paralelizirane numeričke kodove. Da bi se riješile realistične trodimenzionalne simulacije multifizike fluida, neophodan pristup je upotreba paralelnih kodova/knjižnica otvorenog tipa koji omogućuju generičko i učinkovito rješavanje mnogih problema, kao što su: vektorska-matrica i vektorsko-vektorska operacija, rješenja linearnih i nelinearni sustavi, lokalno i globalno iskoračenje iz vremena, optimizacija itd. Neka uobičajena rješenja su PETSc, Trillinos ili Hypre (Keyes i sur., 2013.). Između ostalog, u ovom projektu odabiremo paralelnu biblioteku PETSc (Ballay i sur., 2015.) i PFLOTRAN (Lichtner i sur., 2015.) kao otvoreni numerički kod koji PETSc koristi kao glavni strukturni programerski blok. PFLOTRAN leži na robusnom paralelnom kodu konačnih volumena napisanom u Fortranu 2003 za procese toka i pronosa u podzemnim i površinskim vodama (isti principi kao MODFLOW). Na ovaj način možemo stvoriti bilo koju vrstu simulacija, dodati nove module i razviti nove algoritme s jedne strane te upotrijebiti snažnu snagu postojećih kodova koji omogućuju izravno širenje i prepoznavanje rezultata projekta široj znanstvenoj i stručnoj zajednici s druge strane.

Konačno, u ovom ćemo projektu posebnu pozornost posvetiti provjeri razvijenih novih simulacija i kodova. Korištenjem rezultata u literaturi, postojećim laboratorijskim i terenskim mjerenjima, kao i novim eksperimentima u našem novom Laboratoriju za hidrotehniku u Žrnovnici kod Splita, sva razvijena numerička rješenja verificirat će se na temelju eksperimentalnih rezultata. Iako različiti geofizički i drugi uređaji za obradu izuzetno poboljšavaju sposobnost mjerenja velikog skupa podataka u stvarnim realnim slivovima i istraživačkim područjima (vidjeti pregled Putti i Paniconi, 2015), još je teško izmjeriti sve kritične dijelove i varijable u površinsko-podzemnim vodnim sustavima. Stoga smo odlučili iskoristiti jedinstvenu priliku za provjeru novih algoritmi u skupovima podataka iskopinskih laboratorija.

Dio b. Povezanost projektnog prijedloga s trenutnim stanjem u području istraživanja (*opišite važnost istraživanja predložene teme, istraživanja koja ste do sada proveli u ovom području, najvažnije rezultate i njihovu povezanost s predloženim istraživanjem, njegovu inovativnost i originalost u odnosu na stanje u području. Voditelji projekata koji su već financirani sredstvima HRZZ-a trebaju ukratko navesti naslov i ciljeve provedenog projekta, dobivene rezultate i povezanost s predloženim istraživanjem.*)

Kao što je opisano u „state of the art“ polju istraživanja, multifizika postaje jedno od najvažnijih multidisciplinarnih područja istraživanja jer se većina neriješenih problema ne može riješiti pomoću zajedničkih zasebnih disciplina i metodologija. Između ostalog, problemi multifizike u složenim vodenim sustavima, uključujući interakciju površinskih i podzemnih voda, već su prepoznati kao tipični primjeri gdje zasebne analize ne predstavljaju realna i prihvatljiva rješenja. Štoviše, različiti problemi, uključujući dodatne učinke geomehanike, elastičnosti, termodinamike, električne energije ili zračenja, mogu učiniti analizu u više vodenih sustava još složenijom, što se može uspješno riješiti samo Multiphysics pristupom. Vrlo važan aspekt je bio-ciklus vode, mase i energije unutar ekološkog sustava koji se suočava s interakcijom podzemnih voda s površinskim vodama iz rijeka, kanala, površinskog otjecanja i oceana. Posebno, intenzivna interakcija događa se duž obalnih područja, uključujući miješanje soli i energije unutar složenih podzemnih i površinskih voda.

Kao što je opisano u Odjeljku a) kritične točke u vezi s multifizičkim modelom u površinsko-podzemnim sustavima su: fizikalne formulacije za oba dijela sustava, spajanje površine i podzemlja za tečenje, kao i transport mase i energije, kvaliteta i svojstva primijenjenih numeričkih tehnika, rješavanje multirezolucijske naravi multifizičkih procesa, rješavanje velikih problema, uključujući više različitih poddomena i ogroman broj povezanih jednažbi koje zahtijevaju paralelno računanje, prikladni softver kako bi se mogli riješiti takvi heterogeni problemi i konačno verificiranje računskih modela.

Budući da držimo standardni oblik St. Venantovih jednažbi za površinski protok i Richardsove jednažbe za podzemni tok, kao i jednažbe adveksijsko-disperzijske jednažbe za transport mase i energije, sve ostale gore spomenute aspekte u ovom projektu ćemo pokušati riješiti jedinstvenim i poboljšanim pristupom.

Budući da najčešće površinski i podzemni računalni modeli leže na kontrolnim volumenima, u predloženom projektu odabrana je formulacija kontrolnih volumena zbog svojih svojstava očuvanja održanja što je posebno važno za točne simulacije transporta kod traser testova. Stoga će se koristiti dvije mogućnosti: a) uobičajena formulacija kontrolnog

volumena na temelju otvorenog koda PFLOTTRAN (Lichtner i sur., 2015) i b) nova adaptivna Fup multiresolucijska izogeometrijska analiza na bazikontrolnih volumena razvijena od naše numeričke grupe (CV-IGA; vidi Malenica i sur., 2018 i Kamber i sur., 2018). Budući da površinsko-podzemni sustavi zahtijevaju različite prostorne i vremenske ljestvice kako bi opisali obično brze površinske i znatno sporije procese ispod površine, PFLOTTRAN koristi nestrukturiranu mrežu za prostornu diskretizaciju i različita vremenska razlučivanja za obje domene, dok CV-IGA adaptivno pronalazi sve potrebne prostorne i vremenske skale u obje domene. Na taj način imat ćemo na raspolaganju različite pristupe za rješavanje sustava površinsko-podzemnih voda, ali zadržavajući formulaciju kontrolnih volumena.

Povijesno, razvijeni su različiti odvojeni solveri za površinske i podzemne procese protoka i transporta. Između različitih mogućnosti, u ovom je projektu odabrana generička paralelna biblioteka PETSc odabrana kao osnovna platforma za multifizičko modeliranje sustava površinskih i podzemnih voda. PETSc omogućuje rješavanje velikih 3-D nelinearnih sustava u prostoru i vremenu koristeći paralelno računanje i objektno programiranje. Stoga će se razvijene metode i novi algoritmi implementirati u paralelne kodove otvorenog koda: (1) 3-D CV-IGA primijenjena s PETSc i (2) PFLOTTRAN (novi moduli) kao masivno nestrukturirani klasični kod konačnih volumena za interakciju površinskog i podzemnog toka koje također leže na PETSc i Fortran 2003. Na ovaj način rezultati projekta postaju vidljivi široj zajednici i mogu se lakše uspoređivati s drugim metodama i provjeriti u različitim velikim 3-D realističnim multifizičkim problemima.

Poseban doprinos projektu je provjera razvijenih algoritama pomoću kontroliranih laboratorijskih eksperimenata u novom Hydrolab-u na Sveučilištu u Splitu. Iako nova mjerenja i posebno nove geofizičke metode omogućuju ogroman napredak u mjerenju velikog skupa podataka za Multifizičko modeliranje sustava površinskih i podzemnih voda, vrlo je teško kontrolirati i izmjeriti sve važne segmente procesa pod velikom skalom sliva (skala km^2). Stoga ćemo, koristeći vrlo gusti skup mjernih podataka u dva bazena, imati jedinstvenu priliku da provjerimo mnoga svojstva SSWS algoritama u strogo kontroliranim laboratorijskim uvjetima, posebno efekte spajanja i s tim povezane tokove između površinskih i podzemnih domena.

Konačno, predloženi rezultati projekta koji daju snažne paralelne trodimenzionalne adaptivne i provjerene algoritme pružit će perspektivu budućoj primjeni na realističnijoj mjeri sliva. Stoga primjena novih algoritama u PETSc i PFLOTTRAN može biti relevantna za ekološko i ekološko modeliranje kojim se analizira utjecaj različitih aspekata na eko sustav, kvalitetu vode, transport zagađenja, upad slane vode u obalne regije, klimatsko modeliranje ili hidroenergetsku energiju. Rezultati projekta i razvijeni algoritmi poslužit će kao platforma za daljnju primjenu na različite multifizičke probleme, EU projekte i druge srodne fondove, uključujući poslovni sektor.

Naši prethodni rezultati usko su povezani s istraživačkim područjem, posebno u području izogeometrijske analize, podzemnog toka i numeričkih i stohastičkih modela transporta te nedavno krških modela tečenja kao primjera veze površinskih i podzemnih voda. Naša nuemrička skupina razvila je mnoge numeričke algoritme temeljene na spline (posebno koristeći funkcije Fup-ove mreže) bezmrežnih kolokacijskih metoda u posljednja tri desetljeća, na primjer u konstrukcijskoj mehanici (npr. B. Gotovac i Kozulić, 1999, 2002 ili Kozulić i B. Gotovac, 2000, 2017) ili mehanike fluida (npr. Gotovac i sur. 2003, 2007). Adaptivni algoritmi kolokacije za multirezoluciju za rješavanje problema protoka i podzemlja razvijen je u Gotovac i sur., 2009a. Daljnja primjena spomenutih algoritama kolokacije na podzemni tok i probleme transporta u visoko heterogenim poroznim medijima predstavljena je, na primjer, u najboljim časopisima za vodne resurse Q1 WoS u Gotovac et al., 2009b, 2010, Srzić i sur., 2012, 2013a,b, Cvetković i Gotovac, 2013, 2014, Fiori i sur., 2015).

Nedavni razvoj postignut je kroz Instalacijski istraživački projekt Hrvatske zaklade znanosti (hrvatski HRZZ) - UIP-2013-8103 pod nazivom „Modeliranje protoka podzemnih voda u krškim vodonosnicima“ od 01.10.2014. Do 02.02.2019. U tom se projektu prvi put razvija izogeometrijska formulacija volumena (CV-IGA) (Kamber i sur., 2018).

Također, model protoka krša razvijen je i verificiran na trodimenzionalnom bazenu koji se sada nalazi ispred novog hidrotehničkog laboratorija u Zrnovnici (Malenica i sur., 2018). Korišten je diskretni kontinualni (hibridni) pristup, u kojem je protok trodimenzionalne matrice spojen s jednodimenzionalnim protokom cijevi. Laminarni tok u krškoj matrici opisan je promjenjivo zasićenom jednadžbom protoka kako bi se uzeli u obzir važni hidrodinamički učinci i u zasićenom i u nezasićenom području. Turbulentni protok cijevi za slobodnu površinu i uvjete pod tlakom pod utjecajem tlaka zabilježen je jednadžbom neinerzijskog vala, dok je spajanje dviju domena protoka uspostavljeno razmjenom termina proporcionalnim razlikama glave. Novi numerički pristup koji se temelji na funkcijama Fup-a i formulaciji kontrolnog volumena omogućio nam je dobivanje glatkih i lokalno konzervativnih numeričkih rješenja. Zbog njegove sličnosti s konceptom izogeometrijske analize (IGA), označili smo ga izogeometrijskom analizom kontrolnog volumena (CV-IGA). Budući da je realistična provjera modela krških tokova izuzetno težak zadatak, poseban doprinos ovog rada predstavlja izgradnja posebno dizajniranog 3D fizičkog modela (dimenzije: $5,66 \times 2,95 \times 2,00$ m) kako bi se provjerio razvijeni numerički model pod strogo kontroliranim laboratorijskim uvjetima. Heterogeni porozni materijal korišten je za simulaciju krške matrice, a perforirane cijevi su korištene kao krški vodovi. Model je uspio zabilježiti mnoge karakteristike protoka, poput interakcije između matrice i cjevovoda, infiltracije kiše kroz nezasićenu zonu, izravnog punjenja kroz vrtove, te slobodne površine i protoka pod tlakom u cjevovodima. Iznesena su dva različita pokusa protoka, a usporedba s numeričkim rezultatima potvrdila je valjanost razvijenog modela krškog toka u složenim laboratorijskim uvjetima.

Svi glavni rezultati projekta predstavljeni su u doktorskom radu Malenice (2019). Dodatni rezultat projekta bio je razvoj adaptivne metode multirezolucije temeljene na novim hijerarhijskim Fup-ovim osnovama i CV-IGA (početni 1-D rezultati prikazani su u Kamber i sur., 2018). Između ostalih zanimljivih svojstava, novi adaptivni CV-IGA predstavio je k-usavršavanje kao naprednu verziju lokalnog poboljšanja hp-a, jer se bilo koja osnovna funkcija n -tog reda s jedne razine razlučivosti može zamijeniti linearnom kombinacijom više osnovnih funkcija $n+1$ -og reda na sljedećoj razlučivosti osiguravajući spektralni red konvergencije. 2-D stacionarni rezultati bit će objavljeni u novim člancima i doktorskom radu Grga Kamberra koji bi trebao braniti tezu do kraja ove godine. U fazi jednogodišnjeg projekta, tri su rada trenutno u posljednjoj fazi postupka recenziranja.

Svi ovi rezultati dokazuju da je naša grupa sposobna napraviti još jedan korak prema naprednijem Multifizičkom modeliranju sustava površinskih i podzemnih voda koristeći jedinstvena numerička svojstva novih hijerarhijskih Fup baznih funkcija i CV-IGA, snažne paralelne mogućnosti otvorenih izvornih kodova PETSc i PFLOTRAN, kao i kontrolirani laboratorijski eksperimenti na novom Hydrolab-u u Zrnovnici u pogledu institucionalne potpore FGAG-a i ORNL-a.

Dio c. Metodologija (detaljno opišite metodologiju istraživanja. Detaljno navedite i opišite planirane analize i postupke, opremu koja će se koristiti, broj i vrstu uzoraka, ispitanika i njihovih karakteristika ili područje istraživanja.)

Problemi s multifizikom SSWS zahtijevaju 3-D paralelne velike numeričke simulacije temeljene na PDE. Kao što je već objašnjeno, novi algoritmi za SSWS utemeljeni na klasičnom kontrolnom volumenu ili naprednijem CV-IGA-u bit će ugrađeni u knjižnice otvorenog koda PETSc i PFLOTRAN koji omogućuju tako snažne numeričke simulacije.

Novi SSWS algoritmi počivat će na metodologiji kontrolnog volumena koja omogućuje lokalnu i globalno očuvanje mase i/ili fluksa i manje napora za numeričku integraciju u usporedbi s FEM-om. SSWS algoritmi upotrijebit će diskretno-kontinualni (hibridni) pristup, u kojem su trodimenzionalni podzemni matrični tok i transport povezani s jednodimenzionalnim površinskim tokom i transportom. Jednosmerni površinski tok opisuje protok u kanalima, rijekama ili krškim dubokim vodovodima. Dvosatni površinski protok opisuje protok otjecanja po gornjoj površini domene ili protok loma u lomljenom (karstificiranom) poroznom mediju. Matematički model podzemnog protoka opisuje Richardsova nelinearna jednadžba koja prikazuje uvjete nezasićenih strujanja. Matematički model površinskog protoka opisan je jednadžbama plitke vode ili obično njegovom jednostavnijom verzijom koristeći nelinearnu difuzijsku jednadžbu difuznih valova (Malenica, 2019) koja može opisati laminarni i turbulentni protok, kao i protok pod tlakom ili slobodnim protokom. Prijenos mase i energije u obje domene definiran je dobro poznatom adekvatno-disperzijskom jednadžbom.

Koristit ćemo klasičnu formulaciju kontrolnog volumena u PFLOTRAN-u (Lichtner i sur., 2015) koji koristi jednu nepoznatu varijablu po kontrolnom volumenu/čeliji, dok se tokovi izračunavaju izrazima niskog reda s ograničenom razlikom. Postupak koraka s vremenom obično se dobiva po implicitnoj Eulerovoj bezuvjetno stabilnoj shemi. To je u osnovi vrlo stabilan algoritam drugog reda. PFLOTRAN je u početku napisan za podzemni protok i reaktivne paralelne simulacije. Tu su i površinske, geo-mehanike i još nekoliko modula za pokretanje različitih simulacija Multifizike. Općenito, ostali moduli nisu toliko sofisticirani kao glavni podzemni modul. U ciljevima O2 i O3 trebat ćemo poboljšati te module i izgraditi poboljšanu strategiju spajanja i povezati površinske i podzemne module putem fluksa na sučelju između dviju domena protoka. Ovi novi moduli u PFLOTRAN-u bit će modeliranje doprinosa. Potvrdit će se ispitivanjem protoka i praćenja izvorno proizvedenim u našem novom Hydrolab-u. U objektivnom modulu O4 geomehanika će biti povezan s podzemnim modulom kako bi simulirao hidro-mehaničke multifizičke probleme. Potvrdit će se poznatim primjerima iz literature. Na taj će način primjena PFLOTRAN-a pokriti svu simulaciju u O2-O4.

PFLOTRAN se temelji na paralelnoj biblioteci PETSc (Prijenosni opsežni priručnik za znanstvene proračune; Balay i sur., 2015) koji je glavni građevni blok paralelizma gdje se programer-znanstvenik ne mora brinuti o MPI i proizvodnji samostalnog paralelnog kodiranja. Umjesto toga, programer se može usredotočiti na fiziku i druge pojedinosti metode. PETSc rješava velike rijetke linearne sustave Krylovim potprostornim metodama poput konjugacijskih gradijenata, GMRES i BiGstab. Potrebni su napor za pronalaženje odgovarajućeg predkondicionera koji može značajno ubrzati simulacije. Na primjer, za simulacije PFLOTRAN-a i podloge, aditivni Schwartzov prekondicional (zasnovan na bloku-Jacobi) može biti vrlo robusna opcija (vidi Gotovac i sur., 2009a). Štoviše, PETSc također može riješiti nelinearne sustave različitim vrstom Newtonovih metoda i vremensku integraciju kroz različite implicitne sheme vremenskih koraka. U ovom ćemo projektu koristiti CPU i GPU verzije PETSc-a. Grafička predobrada za povećanje diskretizacije, geometrije, materijala, početnih i graničnih uvjeta i općenito ulaznih podataka i naknadna obrada za vizualizaciju brzina, tokova, hajd i koncentracija izvest će se na novom GPU čvoru koristeći dobro poznate postprocesorske Tecplot i moćan pred i post procesor GiD.

Također će se i naša spomenuta nova formulacija CV-IGA ugraditi u PETSc. Rješenje, kao i geometrija i materijal dobivaju se linearnom kombinacijom spline/Fup-ovih baznih funkcija. Sadržaj rješenja i njegovih derivacija (fluksa) predstavljeni su kao funkcije, a ne kao diskretne vrijednosti u klasičnom obliku PFLOTRAN-a. U ovom slučaju, postoji jedan osnovni koeficijent funkcije kao nepoznata varijabla za svaki kontrolni volumen. Algoritam je sada višeg reda i može koristiti hijerarhijske funkcije Fup-ove baze s gore spomenutim učinkovitim adaptivnim postupcima. Također, strategija povezivanja unutar CV-IGA bit će ključni element za njegovu primjenu u problemima s SSWS-om i samim tim značajan doprinos projektu.

Svi numerički algoritmi bit će provjereni opsežnim eksperimentalnim laboratorijskim mjerenjima. Za eksperimentalne rezultate SSWS-a imamo pokusne tokove (Malenica i sur., 2018.) i traser (trenutno u tijeku) eksperimente u postojećem bazenu (4 * 2,5 * 2m) u Zrnovnici (također financiran od HRZZ). Međutim, imat ćemo novi veći bazen (22 * 4 * 2,6 m) u novom laboratoriju u Zrnovnici kod Splita (planirano otvaranje 1.1.2021.) S opsežnom opremom koja uključuje 360 senzora tlaka i 120 koncentracije i temperature kako bi obavili jedinstveni traser test. U ovom ćemo projektu izraditi ispitivanja praćenja soli i topline da bismo provjerili simulacije interakcija između površine i podloge. Istodobno ćemo mjeriti varijable protoka, kao što su brzine protoka u poroznoj matrici i kanalima / cjevovodima ili glavama u peizometrima, kao i prijenos soli i topline pomoću 120 senzora za mjerenje električne vodljivosti i temperature. Uz to, stanica za oborine iznad oba 3-D bazena može stvoriti željenu razinu oborina i može biti korisna za ispitivanje otjecanja ili pojačanog protoka i transporta u krškim kanalima. Sve će se poruke dobiti u stvarnom vremenu i pohraniti u klaster. Broj eksperimenata bit će koordiniran s kvalitetom numeričke provjere i neriješenim efektima.

U projektu ćemo izvesti i dodatna mjerenja ERT (tomografija s električnim otporom). Posebno je električna otpornička tomografija (ERT) posebna vrsta geofizičkih metoda za lociranje prostorne raspodjele tragača soli u različitim vremenskim intervalima. Budući da senzori tlaka, koncentracije i temperature omogućuju podatke o točki u prostoru, ali kontinuirano bilježe u vremenu, ERT omogućuje suprotnu, prostornu raspodjelu pratilaca u diskretnim vremenskim intervalima. ERT može definirati heterogenost s obzirom na hidrauličku vodljivost sanduksa i uvjete tragača prije testa praćenja. Mjerenje u različitim vremenskim intervalima može zaključiti prostornu raspodjelu soli zbog razlike između zapisa između različitih vremenskih intervala.

U ovom ćemo projektu koristiti konzervativne testove soli i topline. U tom slučaju traseri su jednostavna mješavina soli i slatke vode ili topla voda. Kako imamo opsežnu eksperimentalnu opremu za tlak i koncentraciju - električnu vodljivost, moguće je provesti ispitivanja protoka i soli. Međutim, dodatna predložena mjerenja temperature omogućuju ispitivanja praćenja topline koja su komplementarna traserima soli i daju dodatne informacije o međudjelovanju površine i podloge. Također, traser je samo topla voda, relativno jeftin eksperiment koji omogućuje mnogo više podataka nego samo traženje soli. Osim advekcije i disperzije, provođenje između vode za praćenje topline i čvrste faze također je važan dodatni postupak koji nema za tragove soli. To znači da se predloženi testovi tragača međusobno nadopunjuju.

Konačno, u ovom će se projektu koristiti opsežne i sofisticirane eksperimentalne i numeričke metode. Njihova integracija pružit će bolje razumijevanje rezultata projekta i buduće primjene razvijenih algoritama.

Dio d. Učinak istraživanja (*Opišite očekivani znanstveni doprinos projekta. Opišite učinke istraživanja i doprinos području istraživanja i/ili razvoju društva i gospodarstva, Za primijenjena istraživanja također opišite eventualne potrebe za korištenjem rezultata, grupe potencijalnih korisnika te kakvi se učinci istraživanja mogu očekivati u slučaju njihove primjene.*)

Multifizika stvara nove putove za nove znanstvene discipline i rješenja fizičkih i inženjerskih problema. Multifizika ne znači odvojeno tretiranje fizikalnih komponenti, već je to novi integrirani fizički sustav s novim svojstvima. Posebno, kompleksni sustavi Multifizika-voda predstavljaju vrlo važno polje ne samo za gore navedena pitanja zaštite okoliša, već i platformu za razvoj novih industrijskih tehnologija i proizvoda. Male države poput Hrvatske obično ne mogu osigurati pogone za masovnu industriju, ali razvijeni algoritmi i alati poput PFLOTTRAN-a mogu se koristiti za razvoj novih posebnih tehnologija potrebnih za stvaranje malih i srednjih poduzeća.

Naši rezultati projekta mogu biti vrlo važni za hrvatske vodene resurse. Primjerice, sliv rijeke Jadro opskrbljuje Split veliku gradsku aglomeraciju od 300 000 stanovnika. Novi algoritam u PFLOTTRAN-u razvijen u ovom projektu može se koristiti za analizu protoka i transporta u tom krškom vodonosniku. Privremeno, za ovo važno vodno tijelo ne postoji takva primjena. Drugi primjer je dolina Neretve, važno poljoprivredno područje s problemom prodora slane vode u gornji pijesak-šljunak podvodni vodonosnik.

Rezultati projekta otvaraju mnogo prostora za primjenu na mnoge druge multifizičke (ne samo tekuće) interdisciplinarne probleme. Nadalje, znanstvena suradnja FGAG-a i ORNL-a, daljnja suradnja s drugim partnerima iz EU-a, kao i resursi FGAG-a (novi laboratorij u Zrnovnici) i ORNL-a (prvi superračunalo u svijetu) čvrste su osnove za daljnju primjenu u EU fondovima, ali i na druge projekte između SAD-a i EU.

Posebne mogućnosti su EU fondovi poput Interreg IPA projekata koji omogućuju znanstveni, ali i inženjerski razvoj visoke razine. Također, postoje mnoga sredstva EU-a za zajedničke projekte s poslovnim sektorom. Trenutno imamo projekte IRI kod tvrtke CEMEX za propusne betonske površine. Rezultati projekta alati su za buduća istraživanja i primjenu u sličnim primijenjenim projektima.

Potencijalni dionici predloženih istraživanja su javna poduzeća poput Hrvatskih voda, javnih autoriteta, hrvatskih tvrtki za električnu i vodoopskrbu, agencija za zaštitu okoliša, ali i mnoga mala i srednja poduzeća koja su potencijalno zainteresirana za inovacije i tehnologije povezane s multifizičkim modelom vode.

Dio e. Radni plan (*U ovom dijelu projektnog prijedloga treba biti jasno vidljivo kako će se ostvariti planirani ciljevi projekte. Opišite pristup istraživanju; ciljeve predloženog istraživanja, rezultate i njihovu povezanost s resursima slijedeći predloženu strukturu.*)

d1. Ciljevi (navedite i opišite znanstvene ciljeve predloženog istraživanja.)

Opći cilj ovog projekta je razvoj novih skalabilnih algoritama za paralelno spajanje za fluidne sustave Multiphysics. Da bi se postigao ovaj cilj, predlažu se sljedeći ciljevi projekta:

Cilj – O1: Adaptivno modeliranje temeljeno na hijerarhijskim Fup-ovim funkcijama i izogeometrijskoj analizi

Tijekom posljednjih 15 godina, IsoGeometric Analysis (IGA) privukao je ogromnu pozornost u numeričkom modeliranju zbog svojstava spline baznih funkcija za opisivanje obje, nepravilne geometrije u značenju CAD-a i rješenja problema (Hughes i sur., 2005). Klasični IGA koristi B-spline i NURBS unutar slabe Galerkinove formulacije koja predstavlja takozvani spline-FEM. Cortrell i sur. (2009) predstavio je da IGA općenito omogućuje rješenja višeg reda, kontinuirane tokove i značajno bolja aproksimacijska svojstva od klasičnih FEM-a temeljenih na osnovi Lagrangian-ove funkcije. Osim slabe Galerkinove i snažne kolokacijske formulacije, nedavno smo razvili slabu CV-IGA formulaciju (kontrolni volumen) (Malenica, 2019). Između ostalog, posebno svojstvo IGA je učinkovita konstrukcija adaptivnih algoritama multirezolucije utemeljenih na hijerarhijskim B-splineova u usporedbi s klasičnim FVM i FEM. Naša istraživačka skupina na Sveučilištu u Splitu razvija adaptivne algoritme temeljene na Fup-ovim funkcijama koje su beskonačno izvedive ili savršeni splineovi (npr. Gotovac i sur., 2009). Naš današnji doktorand Grgo Kamber (kojeg također financira HRZZ) uveo je nove hijerarhijske funkcije Fup-ove temelje u CV-IGA-u i primijenio ih na 1-D probleme (Kamber i sur., 2018). Ovi prvi rezultati pokazuju da hijerarhijski Fup-ovski nadmašuje hijerarhijske B-slojeve jer omogućuju eksponencijalnu konvergenciju (B-splines omogućava samo klasičnu polinomsku konvergenciju) i hp prilagodljivi postupak (suprotno h-prilagodbi B-splineova) što znači da viša razina razlučivosti ne samo dodaje osnovne funkcije s manjom kompaktnom potporom ili višim frekvencijama, ali i povećajte redoslijed osnovnih funkcija. Na taj se način opisuje rješenje s optimalnim brojem osnovnih funkcija koristeći različite razine razlučivosti unutar domene na adaptivnoj mreži volumena. Stoga ovaj novi adaptivni postupak ima značajan potencijal za primjenu spomenutih problema Multifizika-fluid. Ovaj cilj dovodi do konstrukcije 2-D i 3-D adaptivnog algoritma s novim hijerarhijskim Fup baznim funkcijama unutar CV-IGA. Konačno, metodologija mora biti prilagođena ispitivanjima praćenja površine i podloge. Štoviše, ovaj novi algoritam implementirat će se u otvoreni kod PETSc.

Ključne aktivnosti u prvom projektnom razdoblju: napisati i razviti dvodimenzionalni nestacionarni adaptivni CV-IGA algoritam u Fortranu koristeći PETSc, definirati diskretizaciju prostora i vremena, definirati preduvjetore i nelinearni solver, verificirati algoritam na poznatim primjerima iz literature i dokazati konvergenciju u prostoru i vremenu, napisati i predstaviti znanstveni članak.

Ključne aktivnosti u drugom razdoblju projekta: napisati i razviti trodimenzionalni nestacionarni adaptivni CV-IGA algoritam u Fortranu koristeći PETSc, definirati vremenski prostor i diskretizaciju, verificirati algoritam na poznate primjere iz literature i dokazati konvergenciju u prostoru i vremenu, pisati i objavlјivati znanstvene radove u časopisu WoS.

Ključne aktivnosti u trećem projektnom razdoblju: definirati provedbu povezivanja fluksa između površinske i podzemne domene pomoću adaptivnog CV-IGA, definirati iterativni postupak za rješavanje Multifizike u obje domene, primijeniti algoritam na PETSc, provjeriti algoritam na testove tragača iz ciljeva O2 i O3, pišu i objavlјuju znanstveni rad u časopisu WoS i jedan konferencijski rad.

Cilj – O2: Multifizičko modeliranje testova praćenja u sustavima rijeka-kanal-podzemlje

Ovim će se ciljem razviti novi algoritam integriranog površinsko-podzemnog hidrološkog sustava koji se sastoji od 1-D kanala/rijeka, 2-D kopnenog površinskog toka kao i 3-D porozne matrice. Algoritam će biti ugrađen u otvoreni izvorni kod PFLOTRAN (klasični pristup konačnom volumenu) koji će ga staviti na raspolaganje stručnoj i znanstvenoj zajednici. Implementacija PFLOTRAN-a omogućit će rješavanje velikih problema uz pomoć PETSc i stabilnih algoritama zahvaljujući primjeni klasičnih metoda niskog reda. Novi algoritam imat će poboljšanu strategiju povezivanja, prilagodljivu (nestrukturiranu) prostornu mrežu u svakoj domeni i različit vremenski korak u domenama brzog površinskog i sporog podzemnog toka. Poseban značaj dat će se verifikaciji pokusa protoka u novim 3-D eksperimentalnim postavkama za spajanje matrice rijeka-kanal-otjecanje-matrica. Nadalje, u ovom ćemo cilju razviti nova ispitivanja praćenja na temelju trasera soli i topline koja će se izvoditi u novom laboratoriju na Sveučilištu u Splitu. Provjera u kontroliranim laboratorijskim uvjetima promovirat će pouzdanost ovih multifizičkih složenih simulacija. Na ovaj će način novi algoritam predstaviti značajno poboljšanje modeliranja za SSWS, posebno za daljnju primjenu u stvarnim sustavima.

Ključne aktivnosti u prvom projektnom razdoblju: stvoriti module u PFLOTRAN-u za povezivanje protoka između površinskog i podzemnog protoka, izvedite nova ispitivanja protoka u novom velikom 3-D bazenu s pijeskom, provjeriti nove module na ispitnim testovima, napisati i prezentirati znanstveni članak.

Ključne aktivnosti u drugom razdoblju projekta: obavljati nova ispitivanja praćenja topline i soli u novom velikom trosmjernom bazenu s pijeskom, provjeriti nove module na testovima praćenja, pisati i prezentirati znanstveni članak.

Ključne aktivnosti u trećem projektnom razdoblju: obavljati nova ispitivanja praćenja topline i soli u novom velikom trosmjernom bazenu s pijeskom, verificirati nove module na testovima praćenja, pisati i predstavljati znanstvene radove na konferencijama, pisati i objavljivati znanstveni rad u časopisu WoS.

Cilj – O3: Multifizičko modeliranje praćenja trasera u krškim sustavima

Ovaj će cilj razviti novi algoritam za integrirane kraške sustave površinskih i podzemnih dijelova koji se sastoje od 1-D kanala i 3-D porozne matrice. Algoritam će biti ugrađen u otvoreni izvorni kod PFLOTTRAN (klasični pristup konačnom volumenu) koji će ga staviti na raspolaganje stručnoj i znanstvenoj zajednici. Implementacija PFLOTTRAN-a omogućit će rješavanje velikih problema uz pomoć PETSc i stabilnih algoritama zahvaljujući primjeni klasičnih metoda niskog reda. Novi algoritam imat će poboljšanu strategiju povezivanja, prilagodljivu (nestrukturiranu) prostornu mrežu u svakoj domeni i različite vremenske korake u domenama brzog površinskog i sporog podzemnog toka. Poseban značaj dat će se provjeri protoka protoka u starim 3-D eksperimentalnim postavkama za spajanje provodnika-matriksa. Štoviše, u ovom cilju razvit ćemo nove testove za praćenje temeljene na tragovima soli i topline koji će se izvoditi u starom 3-D bazenu. Provjera u kontroliranim laboratorijskim uvjetima promovirat će pouzdanost ovih multifizičkih složenih simulacija. Na ovaj će način novi algoritam predstaviti značajno poboljšanje modeliranja za SSWS, posebno za daljnju primjenu na stvarnim krškim sustavima kao što je Jadro.

Ključne aktivnosti u prvom projektnom razdoblju: stvoriti module u PFLOTTRAN-u za spajanje mase i topline između površinskog i podzemnog protoka, izvoditi nova ispitivanja trasera u starom 3-D bazenu s pijeskom, provjeriti nove module na protoku i provedene testove.

Ključne aktivnosti u drugom razdoblju projekta: obavljati nova ispitivanja praćenja topline i soli u starom 3-D bazenu s pijeskom, provjeravati nove module testova, pisati i objavljivati znanstvene radove u časopisu WoS.

Ključne aktivnosti u trećem projektnom razdoblju: obavljati nova ispitivanja praćenja topline i soli u starom 3-D bazenu s pijeskom, provjeravati nove module testova, pisati i prezentirati znanstveni članak.

Cilj – O4: Multifizičko modeliranje hidro-mehaničkih sustava

Ovaj je cilj komplementarni cilj s prva tri cilja. U ovom će se slučaju poboljšati strategija spajanja primijeniti na sučelje pora i čvrste faze unutar iste domene-poroznog medija. To znači da se spajanje između geomehanike i podzemnog modula u PFLOTTRAN-u mora izvesti.

Ključne aktivnosti u prvom projektnom razdoblju: stvoriti module u PFLOTTRAN-u za spajanje geomehanike i modula ispod površine, verificirati nove module na primjerima iz literature.

Ključne aktivnosti u drugom razdoblju projekta: potvrditi nove module na primjerima iz literature, napisati i objaviti znanstvene radove u časopisu WoS.

Ključne aktivnosti u trećem projektnom razdoblju: potvrditi nove module na primjerima iz literature, napisati i predstaviti znanstveni rad na konferenciji.

Cilj – O5: Širenje informacija i znanja

Širenje informacija i znanja je važan zadatak ovog projekta koji će se u cijelosti predstaviti na web stranicama projekta. Svi prethodno navedeni ciljevi stvaraju rezultate koji će se implementirati u otvorene kodove PFLOTTRAN i PETSc. Na ovaj su način rezultati projekta spremni za daljnju prijavu; svi testovi verifikacije (povezani s eksperimentalnim podacima) su lako dostupni svim korisnicima jer su najbrži i najvidljiviji način za širu stručnu i znanstvenu zajednicu. Štoviše, svi će rezultati biti predstavljeni u časopisima i znanstvenim skupovima. Također, za Festival znanosti Sveučilišta u Splitu pripremit ćemo posebnu tribinu - „Multifizička tekućina“ kako bismo predstavili rezultate projekta široj populaciji, poput učenika, običnih ljudi, ekoloških skupina itd., U duhu popularizacije znanosti. Konačno, na kraju projekta organizirat će se Završna radionica koja će stručnim i znanstvenom zajednicom, kao i ostalim dionicima kao što su ekološke organizacije ili javna poduzeća, kao što su vladini odjeli, HEP, Hrvatske vode, VIK, predstaviti sve rezultate projekta. IGH i neki drugi.

d2. Očekivani rezultati (opišite planirane rezultate za svaki istraživački cilj.)

Cilj O1

1 konferencijska prezentacija i 1 članak u časopisima Q1/Q2 WoS koji se odnose na 2-D i 3-D nestacionarni algoritam temeljen na primjeni hijerarhijskih Fup baznih funkcija i adaptivnog CV-IGA u PETSc.

1 konferencijska prezentacija i 1 članak u časopisima Q1/Q2 WoS koji se odnose na trodimenzionalnu primjenu hijerarhijskih Fup baznih funkcija i adaptivni CV-IGA u PETSc-u za provjeru protoka i trasera razvijenih u O2 i O3.

Otvoreni kod u PETSc-u.

Potencijalni korisnici su stručna i znanstvena zajednica

Cilj O2

1 konferencijska prezentacija koja se odnosi na izgradnju modula za protok u površinsko-podzemnim hidrološkim sustavima unutar otvorenog izvornog koda PFLOTTRAN i primjena novog algoritma na postojeće podatke laboratorija protoka.

2 konferencijske prezentacije i 1 članak u časopisima Q1/Q2 WoS koji se odnose na izgradnju modula za protok i transport u površinsko-podzemnim hidrološkim sustavima unutar otvorenog izvornog koda PFLOTTRAN i primjena novog algoritma na podatke laboratorijskih tragača.

Otvoreni kod u PFLOTTRAN-u s novim modulima za Multifizičko modeliranje problema protoka i transporta u površinsko-podzemnim sustavima.

Potencijalni korisnici su stručna i znanstvena zajednica.

Cilj O3

2 konferencijske prezentacije i 1 članak u časopisima Q1/Q2 WoS koji se odnose na razvoj novog algoritma za protok i transport u krško-površinskim krškim sustavima verificiranim na tečenju i tragačkom testu u starom 3-D sandboxu.

Otvoreni kod u PFLOTTRAN-u s novim modulima za multifizičko modeliranje protoka i transportnih problema u površinsko-podzemnim krškim sustavima.

Potencijalni korisnici su stručna i znanstvena zajednica.

Cilj O4

1 konferencijska prezentacija i 1 članak u časopisima Q1/Q2 WoS koji se odnose na razvoj novog algoritma za interakciju geomehanike i potpovršinskog modula u PFLOTTRAN-u.

Otvoreni kod u PFLOTTRAN-u s novim modulima za Multifizičko modeliranje hidro-mehaničkih sustava.

Potencijalni korisnici su stručna i znanstvena zajednica

Cilj O5

2 doktorske disertacije dva doktoranda (Potencijalni korisnici su stručna i znanstvena zajednica).

Tribina „Inženjersko numeričko modeliranje multifizika-fluidnih složenih sustava“ predstavljena je na Festivalu znanosti na Sveučilištu u Splitu u duhu popularizacije znanosti (Potencijalni korisnici su učenici, obični ljudi i šire stanovništvo).

Završni projekt Radionica za prezentaciju svih rezultata projekta (usmena prezentacija, poster, letci). Potencijalni korisnici su stručna i znanstvena zajednica, kao i dionici, poput ekoloških organizacija ili javnih poduzeća, kao što su vladini odjeli, HEP, Hrvatske vode, VIK, IGH i neki drugi.

Web stranice projekta za izravno predstavljanje i vizualizaciju razvijenih algoritama za šire stručnjake i inženjere koji će koristiti razvijene algoritme.

Primjena novog algoritma u PFLOTTRAN-u i PETSc-u može biti relevantna za ekološko i ekološko modeliranje analizirajući utjecaj različitih aspekata na eko-sustav, kakvoću vode, transport zagađenja, upad slane vode u obalne regije, klimatsko modeliranje ili hidroenergetsku energiju. Algoritmi razvijeni od multifizike do fluida mogu se primijeniti u mnogim postojećim i novim industrijskim problemima, a posebno u razvoju novih tehnologija.

d3. Opišite potencijalne rizike predloženog istraživanja te plan postupanja u slučaju navedenih rizika.

Potencijalni rizik za predloženi projekt može predstavljati problem u provedbi infrastrukturnog projekta EU „INFRA“ za izgradnju nove hidrocentrale u FGAG-u. Međutim, u Zrnovnici imamo postojeći manji bazen kako bismo kompenzirali planirane nove eksperimente. Također, uvijek mogu biti mogući problemi s radom, motivacijom i napredovanjem sadašnjih i novih doktoranda i postdoktorata. Pokušat ćemo stvoriti pozitivnu radnu atmosferu i riješiti probleme čim postanu ozbiljniji. Konačno, rizici postoje u postupku nabave opreme u slučaju mogućih pritužbi i ponavljanja postupaka što može dovesti do kašnjenja nekih eksperimentalnih aktivnosti. To ćemo pitanje pokušati riješiti pažljivo pripremljenom natječajnom dokumentacijom, ostavljajući malo prostora za moguće nerazumijevanje i nedefinirane detalje.

Dio f. Resursi (opišite troškove predloženog projekta u HRK, uključujući i resurse koje za potrebe istraživanja na raspolaganje daje organizacija. Navedite sve dodatne izvore financiranja te sve projektne prijedloge koji su prijavljeni ili su u postupku vrednovanja, a povezani su s provedbom predloženog istraživanja. Opišite traženi proračun projekta, povezujući stavke iz financijskog plana sa pripadajućim ciljevima i rezultatima te aktivnostima koje obuhvaćaju navedene stavke. Objasnite sve stavke financijskog plana, a proračun treba biti točan i jasno razrađen. Navedite postotak radnog vremena kojega će predlagatelj posvetiti provedbi projektnog prijedloga.)

Napomena: Kako bi se panelima za vrednovanje olakšala procjena resursa, u opisu resursa trebaju se prikazati podaci navedeni u financijskome planu s oznakama kategorija, potkategorija i stavki iz financijskog plana.

Financijski plan uvelike se temelji na resursima naše institucije - FGAG. FGAG će ovaj projekt podržati novim laboratorijem za hidrotehniku u Žrnovnici kod Splita. Ukupna vrijednost opreme je 16.500.000,00 kuna unutar novogradnje vrijedne 15.000.000,00 kuna. Postoje četiri glavna dijela novog HydroLab-a: 1) Voda vode (26 m) s presjekom $1,2 * 0,6$ m, generator valova i PIV / LIF sustav za mjerenje 3-D brzine i 2-D koncentracije trasera, 2) Vjetar tunel zatvorenog tipa s radnim presjekom ($0,6 * 0,65$ m) i PIV / LIF, 3) 3-D sandbox ($10 * 4 * 2$ m) sa stanicom za oborine, 480 piezometra, 360 tlačnih i 120 senzora koncentracije, 4) sliv ($11 * 4 * 2$ m) s generatorom valova. U ovom ćemo projektu koristiti 3-D bazen za modeliranje površinskog i podzemnog toka i transport za ciljeve O1 i posebno O2. FGAG ima računalni klaster sa 6 CPU čvorova i 144 jezgre. To je mali klaster, posebno prikladan za razvoj algoritama i povezanih kodova, kao u predloženom projektu za sve ciljeve O1-O5. Za realistične 3-D paralelne simulacije Multifizike potrebni su veći resursi.

ORNL-Oak Ridge nacionalni laboratorij je ustanova za suradnju i ima najveće računalne resurse na svijetu. Najnoviji popis deset najvećih svjetskih superračunala (<https://www.networkworld.com/article/3236875/servers/embargo-10-of-the-worlds-fastest-supercomputers.html>), ORNL ima dva superračunala: Summit (više od 2 000 000 CPU / GPU jezgara) na prvom mjestu i Cray xk7-Titan s NVIDIA k20x GPU akceleratorima na 9. mjestu. U ovom ćemo projektu imati koristi od iscrpnih resursa ovisno o rezultatima projekta i našim potrebama.

Konačno, FGAG ima još jedan važan resurs za predloženi projekt. Prvo, postoji manji 3-D sandbox ($4 * 2,5 * 2$ m) sa 50 senzora tlaka i 4 senzora koncentracije (objektivni O3). Nedavno su objavljene simulacije protoka (Malenica i sur., 2018.), dok će se novi tragački testovi dobiti u objektivnom O3.

Ukupni predloženi proračun projekta je gotovo 1.500.000,00 HRK.

Osim starijih istraživača, postoje dva postojeća doktoranda i dva nova Postdoca koji će biti plaćeni projektnim proračunom (2 + 2 godine). Gotovo polovica proračuna u 2. kategoriji bit će utrošena na njihove plaće i druge povezane troškove, uključujući školarinu doktorskog studija za asistenta Krste Živkovića. Doktorandi će 60% radnog vremena posvetiti, dok će dva nova Postdoca 90% radnog vremena potrošiti na projektne aktivnosti. Svi ostali stariji istraživači će 25% svog radnog vremena posvetiti projektu.

U kategoriji 1. Troškovi istraživanja potrebno je malo opskrbe materijala (17.000,00 kn) za provođenje ispitivanja protoka i praćenja u novom HydroLabu. Dodatne usluge potrebne su i za ugradnju nove kasetne opreme i njihovog održavanja (42.000,00 HRK). Podrška savjetovanja i stručnosti potrebna je za pokrivanje posebnih projektnih aktivnosti poput IT stručnosti za održavanje klastera i instalacije GPU čvorova za koje je potrebno posebno znanje za Linux operativne sustave kao i za izradu i web stranice koje će povećati vidljivost projekta (8.000,00 HRK). Posebno je električna otpornička tomografija (ERT) posebna vrsta geofizičkih metoda za lociranje prostorne raspodjele tragača soli u različitim vremenskim intervalima. Budući da senzori tlaka, koncentracije i temperature omogućuju podatke o točki u prostoru, ali kontinuirano bilježe u vremenu, ERT omogućuje suprotnu, prostornu raspodjelu pratilaca u diskretnim vremenskim intervalima. ERT može definirati heterogenost s obzirom na hidrauličku vodljivost sanduksa i uvjete tragača prije testa praćenja. Mjerenje u različitim vremenskim intervalima može zaključiti prostornu raspodjelu soli zbog razlike između zapisa između različitih vremenskih intervala. Takva mjerenja mogu obavljati samo posebne licencirane tvrtke opremljene ERT instrumentima za geofiziku. Devet mjernih kampanja koštati će 200.000,00 kuna. Ovi ERT poruke potrebni su za ciljeve O1-O3. Ovu kategoriju obuhvaćaju terenska istraživanja u slivu Jadroa (20.000,00 kn) i kupovina znanstvene literature (6.000,00 HRK).

U kategoriji 3. Troškovi opreme, još jedna važna nadogradnja nove opreme su dva GPU čvora koja će biti instalirana u postojeći klaster na FGAG. Budući da klaster ima samo 6 CPU čvorova, ova nova nadogradnja omogućit će korištenje PETSc-a i na CPU i GPU čvorovima koji je kompatibilan s spomenutim ORNL superračunalima. Jedan novi GPU čvor sastojat će se od 12 CPU jezgara i jedne GPU kartice NVIDIA Tesla T4 16GB s 2560 GPU jezgri. Štoviše, bit će instaliran drugi GPU čvor i nadogradnja softvera - Tecplot i GiD samo za grafičko pred i postprocesu. Ova nadogradnja važna je za sve ciljeve O1-O5.

U kategoriji 4. Troškovi širenja obuke i troškovi publikacija, predloženi projekt pokriva troškove putovanja, naknada za smještaj i ostale troškove za različite aktivnosti: a) dvotjedni trening u ORNL - partnerskoj organizaciji koji će osigurati koordinaciju svih projektnih aktivnosti, a posebno rad na provedbi novih modula u PFLOTRAN-u i PETSc-u (70.000,00 kn), b) sudjelovanje na sedam međunarodnih znanstvenih skupova osigurat će širenje rezultata; c) organiziranje završnog projekta Radionica će predstaviti sve rezultate za širu zajednicu i različite zainteresirane dionike (8.000,00 HRK), d) organiziranje 1. međunarodne konferencije o atomskim i R-funkcijama od strane glavnog istražitelja promovirati će aktivnosti predviđanja, posebno CV-IGA i nove hijerarhijske funkcije Fup-ove osnove i e) troškove objavljivanja za otvorene časopise u svrhu boljeg i bržeg prezentirati znanstvene rezultate 40.000,00 HRK). Ova kategorija trošila je najviše novca, 70.000 HRK godišnje.

Dio g. Etička pitanja

U uputama za prijavu na natječaj nalazi se tablica u kojoj su navedena etička pitanja. Ukoliko se na Vaše istraživanje može primijeniti neko od pitanja u tablici, molimo da u prijavi projektnog prijedloga pod dodatnu dokumentaciju

priložite potvrdu nadležnoga etičkog povjerenstva o etičnosti istraživanja u kojoj su navedena etička pitanja. Ukoliko potvrda nije dostavljena prilikom prijave projektnoga prijedloga, može biti dostavljena tijekom vrednovanja projekta.

U predloženom projektu nema problematičnih etičkih pitanja.

Cjelina C - Istraživačka grupa

Navedite sve osobe koje će sudjelovati u provedbi predloženog istraživanja (navedite suradnike (S), doktorande (D)* i poslijedoktorande (P)* koji će biti zaposleni na projektu)						
Ime i prezime	Titula	Organizacija	Država	Godina stjecanja doktorata znanosti (ako je primjenjivo)	Status na projektu (S, D, P)	Postotak radnog vremena za rad na projektu
Vedrana Kozulić	PhD, Profesor	Fakultet građevinarstva arhitekture i geodezije (FGAG)	Hrvatska	1999	S	25%
Blaž Gotovac	PhD, Profesor	(FGAG)	Hrvatska	1987	S	25%
Ivan Đepina	PhD, PostDoc	(FGAG)	Hrvatska	2016	P	25%
Grgo Kamber	Doktorand	(FGAG)	Hrvatska		D	60%
Krste Živković	Doktorand	(FGAG)	Hrvatska		D	60%
PostDoc I	PhD	(FGAG)	Hrvatska		P	90%
PostDoc II	PhD	(FGAG)	Hrvatska		P	90%

* za doktoranda i/ili poslijedoktoranda koji nisu zaposleni u trenutku prijave već se njihovo zaposlenje planira projektom, u stupcu „ime i prezime“ navesti status na projektu i dodati postotak planiranog radnog vremena za rad na projektu.

Dio a. Istraživačka grupa (opišite uloge i njihove zadaće u provedbi projekta)

Vedrana Kozulić	S, Istraživač za cilj O1
Blaž Gotovac	S, Istraživač za cilj O1
Ivan Đepina	P, Istraživač za cilj O4
Grgo Kamber	D, Istraživač za ciljeve O1, O2
Krste Živković	D, Istraživač za ciljeve O1-O3
Postdoc I	P, Istraživač za ciljeve O1-O2
Postdoc II	P, Istraživač za ciljeve O1-O3

Dio b. Životopisi suradnika odnosno opis profila i kompetencija za članove koji će se zaposliti tijekom trajanja projekta (Životopis treba slijediti strukturu Popisa postignuća (*track record*) cjelina A, dio a ovog dokumenta. Dodati redove po potrebi)

Ime i prezime: Vedrana Kozulić, matični broj znanstvenika²: 176112

Životopis (najviše 1 stranica)

Rođena: 13. siječnja 1962. godine u Splitu, po narodnosti Hrvatica. Redoviti profesor od 2010. godine. Titulu magistar tehničkih znanosti iz područja građevinarstva stekla 1993. godine (naslov rada: Numerička analiza konstrukcija sastavljenih od ljuski i stupova). Titulu doktor tehničkih znanosti stekla 1999. godine (naslov rada: Numeričko modeliranje metodom fragmenata pomoću Rbf funkcija). Područja istraživanja: suvremeno numeričko modeliranje linearnih i nelinearnih problema u tehničkoj mehanici, problematika diskretizacije kontinuuma, modeliranje nosivih konstrukcija i razvoj novih numeričkih postupaka u cilju poboljšanja kvalitete približnih rješenja. Član Hrvatskog društva za mehaniku, Central European Association for Computational Mechanics (CEACM), European Mechanics Society (EUROMECH), te Udruge građevinskih inženjera Split. Govori i piše engleski jezik.

Od 1990.-2002. godine zaposlena na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Splitu kao znanstveni novak te na Katedri za tehničku mehaniku izvodila nastavu kao asistent na predmetima Mehanika II i Primjenjena teorija elastičnosti. Od 2002.-2009. godine zaposlena na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci i izvodila predavanja iz predmeta Građevinska statika I i Građevinska statika II. Od 2009. godine do danas zaposlena na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu te izvodi nastavu iz predmeta: Tehnička mehanika I i Tehnička mehanika II na stručnom studiju građevinarstva, Mehanika deformabilnog tijela i Plošne konstrukcije na sveučilišnom diplomskom studiju građevinarstva, Numeričko modeliranje ljuskastih konstrukcija i Bezmrežne numeričke metode i pripadajuće adaptivne tehnike na sveučilišnom poslijediplomskom (doktorskom) studiju građevinarstva.

Redoviti profesor (2010.-danas), Izvanredni profesor (2006.-2010.), Docent (2002.-2006.), Viši asistent (1999.-2002.), Znanstveni novak-asistent (1990.-1999.)

Sudjelovala kao suradnik na 5 znanstveno-istraživačkih projekata Ministarstva znanosti i tehnologije Republike Hrvatske: Nelinearno numeričko modeliranje građevinskih konstrukcija (2-11-054) (1991.-1996.), Numeričko modeliranje inženjerskih konstrukcija (083133) (1997.-2000.), Numeričko modeliranje prostornih inženjerskih konstrukcija (083132) (2000.-2002.), Suvremeno numeričko modeliranje tunela i podzemnih građevina (0083041) (2002.-2005.), Numeričko modeliranje kvazi-krtih materijala (0114002) (2002.-2005.); na jednom projektu Hrvatske zaklade za znanost: Modeliranje toka podzemnih voda u krškim vodonosnicima (HRZZ-UIP-2013-11-8103) (2014.-2017.). Bila je voditelj jednog znanstvenog projekta "Adaptivno bezmrežno modeliranje u projektiranju građevinskih konstrukcija" (083-0831541-1534) kojega je financiralo MZOS Republike Hrvatske (2007.-2013.).

Objavila 65 znanstvena rada, među njima 5 znanstvenih radova objavljenih kao poglavlja u znanstvenim knjigama s međunarodno priznatom recenzijom indeksiranim u bazama podataka Cambridge Scientific Abstracts, INSPEC, Google Scholar i Scopus, 8 znanstvenih radova u časopisima s međunarodno priznatom recenzijom indeksiranim u CC, SCI, SCI-Expanded bazama, 3 znanstvena rada u časopisima s međunarodno priznatom recenzijom indeksiranim u ostalim bazama, 30 radova u zbornicima radova s međunarodnih znanstvenih skupova, 11 radova u zbornicima radova s domaćih znanstvenih skupova. Imala 3 pozvana predavanja na međunarodnim znanstvenim skupovima, 15 predavanja na međunarodnim znanstvenim skupovima i 6 predavanja na domaćim znanstvenim skupovima. Sudjelovala u radu 22 međunarodnih i 8 domaćih znanstvenih skupova. Recenzirala znanstvene radove u časopisima Applied Mathematics and Computation, Applied Mathematical Modelling, Transactions of FAMENA, Građevinar i International Journal for ENGINEERING MODELLING.

Cjeloviti popis radova na linku:

<https://www.scopus.com/results/results.uri?sort=plf-f&src=s&st1=Kozulic&st2=V.&nlo=1&nlr=20&nls=afprfnm-t&sid=edbed0cff3787e192332454322ca297c&sot=anl&sdt=aut&sl=36&s=AU-ID%28%22Kozuli%2c%27Vedrana%22+7801669505%29&partialQuery=&txGid=6e0e9e5dee75bf7e650f392285d6df30>

²Registracijski broj dodijeljen svakoj osobi nakon upisa u Registar Ministarstva znanosti i obrazovanja.

Ime i prezime: Blaž Gotovac, matični broj znanstvenika: 014020

Životopis (najviše 1 stranica)

Rođen: 22. siječnja 1951. godine, po narodnosti Hrvat. Redoviti profesor od 2002. godine. Titulu magistar tehničkih znanosti iz područja građevinarstva stekao 1982. godine (naslov rada: Analiza ravninskog problema u elastičnom i hidrodinamičkom poroznom mediju). Titulu doktor tehničkih znanosti stekao 1987. godine (naslov rada: Numeričko modeliranje inženjerskih problema pomoću glatkih finitnih funkcija). Područja istraživanja: suvremeno numeričko modeliranje linearnih i nelinearnih problema u tehničkoj mehanici, problematika diskretizacije kontinuuma, modeliranje nosivih konstrukcija i razvoj novih numeričkih postupaka, razvoj postupaka za obnovu objekata kulturne baštine (konstrukcija samostana sv. Marije na otoku Mljetu, Knežev dvor u Dubrovniku, voditelj izgradnje Starog mosta u Mostaru, sanacija svih dubrovačkih kamenih mostova i sl.). Član Hrvatskog društva za mehaniku, Hrvatskog geotehničkog društva, Hrvatske komore arhitekata i inženjera u graditeljstvu te Udruge građevinskih inženjera Split. Služi se ruskim i engleskim jezikom.

Od 1975. godine zaposlen na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Splitu na Katedri za tehničku mehaniku. Izvodi nastavu na predmetu Mehanika II na preddiplomskom sveučilišnom studiju građevinarstva, na predmetima: Mehanika deformabilnog tijela, Plošne konstrukcije, Tuneli i podzemne građevine, Konstrukcije povijesnih građevina na sveučilišnom diplomskom studiju građevinarstva, na predmetima Numeričko modeliranje ljuskastih konstrukcija i Bezmrežne numeričke metode i pripadajuće adaptivne tehnike na sveučilišnom poslijediplomskom (doktorskom) studiju građevinarstva.

Redoviti profesor (2002.-danas), Izvanredni profesor (1996.-2002.), Docent (1988.-1996.), Asistent (1976.-1987.) Sudjelovao je kao suradnik na 5 znanstveno-istraživačkih projekata: Stabilnost plošnih konstrukcija (1983.-1984.), Numerički model ponašanja materijala sa širenjem i praćenjem pukotina (1983.), međunarodni edukativni projekt TEMPUS-ICADERS (Integrated CAD of Earthquake Resistant Buildings and Civil Engineering Structures) (1992-1995), Adaptivno bezmrežno modeliranje u projektiranju građevinskih konstrukcija (083-0831541-1534) kojega je financiralo MZOS Republike Hrvatske (2007.-2013.), Modeliranje toka podzemnih voda u krškim vodonosnicima (HRZZ-UIP-2013-11-8103) (2014.-2017.). Bio je voditelj znanstvenih projekata: Nelinearno numeričko modeliranje građevinskih konstrukcija (2-11-054) (1991.-1996.), Numeričko modeliranje inženjerskih konstrukcija (083133) (1997.-2000.), Numeričko modeliranje prostornih inženjerskih konstrukcija (083132) (2000.-2002.), Suvremeno numeričko modeliranje tunela i podzemnih građevina (0083041) (2002.-2005.).

Objavio je 72 znanstvena rada, među njima 5 znanstvenih radova objavljenih kao poglavlja u znanstvenim knjigama s međunarodno priznatom recenzijom indeksiranim u bazama podataka Cambridge Scientific Abstracts, INSPEC, Google Scholar i Scopus, 10 znanstvenih radova u časopisima s međunarodno priznatom recenzijom indeksiranim u CC, SCI, SCI-Expanded bazama, 9 znanstvenih radova u drugim časopisima, 30 radova u zbornicima radova s međunarodnih znanstvenih skupova, 18 radova u zbornicima radova s domaćih znanstvenih skupova. Recenzirao znanstvene radove u časopisima Transactions of FAMENA, Građevinar i International Journal for ENGINEERING MODELLING.

Cjeloviti popis radova na linku:

<https://www.scopus.com/results/results.uri?sort=plf-f&src=s&st1=Gotovac&st2=B.&nlo=1&nlr=20&nls=afprfnm-t&sid=5aa3331e46d9716f83aa96fda64a192b&sot=anl&sdt=aut&sl=33&s=AU-ID%28%22Gotovac%2c+Bla%c5%be%22+6602441620%29&partialQuery=&txGid=e7398db9a0565e5e29dfa3cc358ccebd>

Ime i prezime: Ivan Đepina, matični broj znanstvenika: --

Životopis (najviše 1 stranica)

Obrazovanje

2012–2016 Doktorski studij, Norwegian University of Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering, Trondheim, Norveška, Tema doktorskog rada: Reliability Analysis of Monopile Foundations for Offshore Wind Turbines.

2009–2011 Diplomski studij gra.evinarstva, Sveučilište u Splitu, Fakultet gra.evinarstva, arhitekture i geodezije, Split, Hrvatska.

2006–2009 Preddiplomski studij gra.evinarstva, Sveučilište u Splitu, Fakultet gra.evinarstva, arhitekture i geodezije, Split, Hrvatska.

Disertacije

Đepina, Ivan. (2016) Reliability analysis of monopile foundations for offshore wind turbines. *Doktoravhandling ved NTNU (2016:171)*, ISBN 978-82-471-4196-0.

Đepina, Ivan. (2011) Potresna otpornost zidanih zgrada od opeke. *Diplomski rad, Sveučilište u Splitu, Fakultet gra.evinarstva, arhitekture i geodezije, (624.042)*.

Publikacije

Objavio 7 članaka u WoS časopisu.

Nagrade i priznanja

Top stipendija za top studente. Nagrada za izvrsnost na nacionalnoj razini, Hrvatska, 2011

Rektorova nagrada. Nagrada za izvrsnost na razini Sveučilišta u Splitu, Hrvatska, 2009/10

Dekanova nagrada. Nagrada za izvrsnost na razini Fakulteta gra.evinarstva, arhitekture i geodezije, Split, Hrvatska, za godine 2007/08, 2008/09 i 2009/10

Konferencijske publikacije

Objavio 13 znanstvenih radova na međunarodnim znanstvenim konferencijama

Projekti

-KlimaDigital; *Reducing societal risks imposed by geohazards in the changing climate supported by the digital technology.*; URL: klimadigital.no.

-SAMCoT; *Sustainable Arctic Marine and Coastal Technology, WP6 Erosion protection of Arctic coasts*; URL: <https://www.ntnu.edu/samcot>.

-Klima 2050; *Reduction of societal risks associated with climate change*; URL: klima2050.no.

-Geofuture II; *Supply the building, construction and transport industry with methods and tools for geotechnical design and calculations*; URL: <https://www.ngi.no/eng/Projects/Geofuture/Geofuture-2>.

-MPFS; *Development of Multi-Purpose Floating Structures*. URL: <http://137.132.5.169>

-REMEDY; *Reducing the risk of damage caused by groundwork during and after execution of a project, and the risk of damage to neighbouring structures*; URL: [https://www.ngi.no/eng/Projects/BegrensSkade-IIREMEDY-](https://www.ngi.no/eng/Projects/BegrensSkade-IIREMEDY-Risk-Reduction-of-Groundwork-Damage)

Risk-Reduction-of-Groundwork-Damage. FROST; *Ground freezing under road and railway infrastructure*, URL: <https://www.ntnu.edu/ibm/frost>.

Ime i prezime: Krste Živković, matični broj znanstvenika:--

Životopis (najviše 1 stranica)

Rođen: 14.06.1979.

Mjesto stanovanja: Šibenik / Šibenik

Oženjen i otac dvoje

Obrazovanje

1997-2005 – FGAG (Prvostupnik -low level)

2008 – 2010 – FGAG (Prvostupnik)

Radno iskustvo

2005. - 2006. "Zmajevo oko-Rogoznica" d.o.o.

2008. "KraK"d.o.o.

2011. - "Komunalno poduzeće"d.o.o. Knin

2019 – present – PhD student at FGAG

Ime i prezime: Grgo Kamber, matični broj znanstvenika: --

Životopis (najviše 1 stranica)

Rođen: 27. kolovoza 1990. u Splitu, po narodnosti Hrvat. Osnovnu i srednju školu završio je u Splitu. Nakon završene III gimnazije upisuje se na sveučilišni preddiplomski studij građevinarstva akademske godine 2009./2010., a 2012./2013. na diplomski studij građevinarstva (smjer: hidrotehnika) na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije sveučilišta u Splitu. Diplomirao je 18. srpnja 2014. kod mentora izv. prof. dr. sc. Mije Vranješa s temom: "Fizikalni model AB propusnog lukobrana", te stekao naziv magistar inženjer građevinarstva. Od lipnja 2015. do lipnja 2016. zaposlen je kao pripravnik na stručnom osposobljavanju u tehničkoj službi Kliničkog bolničkog centra Split. Nakon završenog stručnog osposobljavanja 2016. godine do danas zaposlen na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije sveučilišta u Splitu kao doktorand-asistent na Katedri za tehničku mehaniku.

Sudjelovao je kao suradnik na znanstveno-istraživačkom projektu: Modeliranje toka podzemnih voda u krškim vodonosnicima (HRZZ-UIP-2013-11-8103) (2014.-2017.). Kao koautor ima jedan izvorni znanstveni rad u časopisu referenciranom u WoS i CC bazi, te je sudjelovao na pet međunarodnih znanstvenih konferencija.

Reference

(Navedite popis literature kojom ste se služili u izradi projektnog prijedloga. Ograničenje od 15 stranica za Prijavni obrazac ne uključuje reference).

- Aurichio, F., Da Veiga, L.B., Hughes, T.J.R., Real, A., Sangalli, G., "Isogeometric collocation methods", Mathematical models and methods in applied sciences, (2010), 20(11), 2075-2107, 10.1142/S0218202510004878.
- Baliga, B. R. and S. V. Patankar, "A control volume finite-element method for two-dimensional fluid flow and heat transfer" Numerical Heat Transfer , (1983), 6 (3), 245-261.
- Bekele, Y.W., Kvamsdal, T., Kvarving, A. M. and S. Nordal, "Adaptive isogeometric finite element analysis of steady-state groundwater flow", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, (2016), 40 (5), 738–765, DOI:10.1002/nag.2425. arXiv: nag.2347 [10.1002].
- Bellin, A., Salandin, P., Rinaldo, A., „Simulation of Dispersion in Heterogeneous Porous Formations: Statistics, First-Order Theories, Convergence of Computations“, Water Resources Research, (1992), 28, 2211-2277, 10.1029/92WR00578.
- Boso, F., Bellin, A., Dumbser, M., "Numerical simulations of solute transport in highly heterogeneous formations: A comparison of alternative numerical schemes", ADVANCES IN WATER RESOURCES, (2013), 52, 178-189, DOI: 10.1016/j.advwatres.2012.08.006.
- Cainelli, O. Bellin, A. and M. Putti, "On the accuracy of classic numerical schemes for modeling flow in saturated heterogeneous formations", ADVANCES IN WATER RESOURCES, (2012), 47, 43-55, DOI: 10.1016/j.advwatres.2012.06.016.
- Cordes, C., and Kinzelbach, W., Continuous groundwater velocity fields and path lines in linear, bilinear, and trilinear finite elements, Water Resour. Res. , (1992), 28(11), 2903– 2911, doi:10.1029/92WR01686.
- Cottrell, J. A., Hughes, T. J. R. and Y. Bazilevs, "Isogeometric Analysis Toward Integration of CAD and FEA", (2009), pp. 335, Wiley and Sons, ISBN: 978-0-470-74873-2.
- Dalcin, L., Collier, N., Vignal, P., C.rtes, A. and V. Calo, "PetIGA: A framework for high-performance isogeometric analysis", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, (2016), 308,151–181, DOI:10.1016/J.CMA.2016.05.011.
- De Lorenzis, L., Evans, J.A., Hughes, T.J.R., Reali, A., „Isogeometric collocation: Neumann boundary conditions and contact“, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, (2015), 284, 21–54, 10.1016/j.cma.2014.06.037.
- Ferziger, J. H. and M. Peric, Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer, (2002), pp. 423, ISBN: 978-3-540-78091-5. DOI: 10.1007/978-3-642-98037-4.
- Gomez H. and L. D. Lorenzis, "The variational collocation method", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, (2016), 309, 152 –181, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2016.06.003>.
- Gotovac, B. and V. Kozulic, "On a selection of basis functions in numerical analyses of engineering problems", International Journal for Engineering Modelling, (1999), 12, 1-4, 25–41, ISSN: 13301365.
- Hammond, G.E., Lichtner, P.C. and R.T. Mills, „Evaluating the performance of parallel subsurface simulators: An illustrative example with PFLOTTRAN“, Water Resources Research, (2014), 50, 208-228, doi:

10.1002/2012WR013483.

Harbaugh, A.W., "MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-the Ground-Water Flow Process", 2005.

Hennig, P., Kastner, M., Morgenstern, P., Peterseim, D., "Adaptive mesh refinement strategies in isogeometric analysis - A computational comparison", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, (2017), 316, 424-448, <https://doi.org/10.1016/j.cma.2016.07.029>.

Hughes, T.J., Cottrell, J.A. and Y. Bazilevs, "Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, (2005), 194, 39-41, 4135-4195, DOI: 10.1016/j.cma.2004.10.008.

Kozulic, V., Gotovac, B., "Numerical analyses of 2D problems using Fupn (x, y) basis functions", *International Journal of Engineering modelling*, (2000), 13 (1-2), 7-18.

Kozulic, V., Gotovac, B., "Application of the Solution Structure Method in Numerically Solving Poisson's Equation on the Basis of Atomic Functions", *International Journal of Computational Methods*, (2017), 15, 1850033.

10.1142/S0219876218500330.

LaBolle, E. M., Fogg, G. E., Tompson, A. F. B., "Random-Walk Simulation of Transport in Heterogeneous Porous Media: Local Mass-Conservation Problem and Implementation Methods", *Water Resour. Res.*, (1996). 32(3), 583-593, doi:10.1029/95WR03528.

Mose, R., Siegel, P., Ackerer, P., and Chavent, G., Application of the mixed hybrid finite element approximation in a groundwater flow model: Luxury or necessity?, *Water Resour. Res.*, (1994), 30(11), 3001- 3012, doi:10.1029/94WR01786.

Nguyen, M. N., Bui, T. Q., Yu, T., Hirose, S., "Isogeometric analysis for unsaturated flow problems", *Computers and Geotechnics*, (2014), 62, 257-267, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.08.003>.

Park, C-H., Beyer, C., Bauer, S., Kolditz, O. A study of preferential flow in heterogeneous media using random walk particle tracking, (2008), *Geosciences Journal*. 12. 285-297. 10.1007/s12303-008-0029-2.

Patankar, S.V., Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Pub. Corp., (1980), pp. 197, ISBN: 9780891165224.38

Schillinger, D., Evans, J. A., Reali, A., Scott, M.A. and T. J. Hughes, "Isogeometric collocation: Cost comparison with Galerkin methods and extension to adaptive hierarchical NURBS discretizations", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, (2013), 267, 170-232, DOI: 10.1016/j.cma.2013.07.017.

Shahrbanozadeh, M., Barani, G-A., Shojaei, S., "Simulation of flow through dam foundation by isogeometric method", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, (2015), 18 (2), 185-193, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2014.11.001>.

Luka Malenica, Hrvoje Gotovac, Grgo Kamber, Srdjan Simunovic, Srikanth Allu, Vladimir Divić; Groundwater flow modeling in karst aquifers: Coupling 3D matrix and 1D conduit flow via control volume isogeometric analysis - experimental verification on 3D physical model, *Water*, (2018), 10(12), 1787; <https://doi.org/10.3390/w10121787>.

Galešić, Morena; Andričević, Roko; Gotovac, Hrvoje; Srzić, Veljko. Concentration statistics

of solute transport for the near field zone of an estuary. // *Advances in water resources*. 94 (2016) ; 424-440.

Fiori, Aldo; Zarlenga, Alberto; Gotovac, Hrvoje; Janković, Igor; Volpi, Elena; Cvetković, Vladimir; Dagan, Gedeon.

Advective transport in heterogeneous aquifers: Are proxy models predictive?. // *Water resources research*. 51 (2015) , 12; 9577-9594.

Cvetković, Vladimir; Gotovac, Hrvoje. On the upscaling of chemical transport in fractured rock. // *Water resources research*. 50 (2014) , 7; 5797-5816.

Cvetković, Vladimir; Gotovac, Hrvoje. Flow-dependence of matrix diffusion in highly heterogeneous rock fractures. // *Water resources research*. 49 (2013) , 11; 7587-7597.

Srzić, Veljko; Cvetković, Vladimir; Andričević, Roko; Gotovac, Hrvoje. Impact of aquifer heterogeneity structure and local scale dispersion on solute concentration uncertainty. // *Water resources research*. 49, 1-17 (2013) doi: 10.1002/wrcr.20314.

Srzić, Veljko; Andričević, Roko; Gotovac, Hrvoje; Cvetković, Vladimir. Collapse of higher order concentration moments in groundwater transport. // *Water resources research*. 49, 1-14 (2013) doi: 10.1002/wrcr.20371. Andričević, Roko; Srzić, Veljko; Gotovac, Hrvoje. Risk characterization for toxic chemicals transported in aquifers. // *Advances in water resources*. 36 (2012) , S. I.; 86-97 .

Gotovac, Hrvoje; Cvetković, Vladimir; Andričević, Roko. Significance of higher moments for complete characterization of the travel time probability density function in heterogeneous porous media using the maximum entropy principle. // *Water resources research*. 46 (2010) ; 05502-1-05502-14.

Gotovac, Hrvoje; Cvetković, Vladimir; Andričević, Roko. Adaptive Fup multi-resolution approach to flow and advective transport in highly heterogeneous porous media: Methodology, accuracy and convergence. // *Advances in water*

resources. 32 (2009b) , 6; 885-905.

Gotovac, Hrvoje; Cvetković, Vladimir; Andričević, Roko. Flow and travel time statistics in highly heterogeneous porous media. // Water Resources Research. 45 (2009a) ; 7402-1-7402-24.

Gotovac, Hrvoje; Andričević, Roko; Gotovac, Blaž. Multi-resolution adaptive modeling of groundwater flow and transport problems. // Advances in Water Resources. 30 (2007) , 5; 1105- 1126.

Gotovac, Hrvoje; Andričević, Roko; Gotovac, Blaž; Kozulić, Vedrana; Vranješ, Mijo. An improved collocation method for solving the Henry problem // *Journal of Contaminant Hydrology*, **64** (2003), 1-2; 129-149.