

Oznaka obrazca: ARIS-RPROJ-ZP-2026/60

Status: Oddano - Digitalno podpisano



Zaključno poročilo o rezultatih raziskovalnega projekta

Datum zadnjega urejanja podatkov: 26. 03. 2026 07:32:50

A. Podatki o raziskovalnem projektu



1. Osnovni podatki o raziskovalnem projektu

Šifra	J2-4477
Naslov	RAZVOJ INOVATIVNIH BREZMREŽNIH METOD ZA VEČFIZIKALNE IN VEČNIVOJSKE SIMULACIJE VRHUNSKIH TEHNOLOGIJ
Vodja	4101 - Božidar Šarler
Tip	J - Temeljne raziskave
Cenovna kategorija	B
Obdobje trajanja (vključno s podaljšanjem brez sofinanciranja)	od 1. 10. 2022 do 30. 09. 2025
Matična raziskovalna organizacija	782 - Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
Raziskovalne organizacije - soizvajalke	206 - Inštitut za kovinske materiale in tehnologije
Raziskovalno področje po šifrantu ARIS	2 - Tehnika 2.13 - Procesno strojništvo
Družbeno-ekonomski cilj	13.2 - Tehnološke vede - RiR financiran iz drugih virov (ne iz SUF)
Raziskovalno področje po šifrantu FORD	2 - Tehniške in tehnološke vede 2.03 - Mehanika

B. Rezultati in dosežki raziskovalnega projekta



2. Povzetek raziskovalnega projekta

SLO

Znanstveni cilji raziskovalnega projekta so bili osredotočeni k izboljššanemu fizikalnemu popisu in nadaljnjemu razvoju brez mrežnih metod za mehaniko tekočin in trdnin večfaznih sistemov ob prisotnosti elektromagnetnih (EM) polj. Projekt je temeljil na: a) Nadaljnem razvoju naslednjih dosežkov: prva demonstracija sklopljene časovne in prostorske prilagodljivosti na podlagi štiriške manipulacije raztresenih podatkov, nove večstopenjske tehnike za hitro reševanje sistemov enačb, ki izhajajo iz brez mrežnih diskretizacij, nove tehnike za stabilizacijo konvektivno dominantnih problemov, novi brez mrežni reševalci za newtonske tekočine, stisljivi tok, simulacijo turbulence na podlagi velikih vrtincev (LES), simulacijo faznega polja (FP) za evolucijo mikrostrukture, 3D simulacijo magnetohidrodinamike (MHD), modeliranje problemov Stokesovih tokov s prostimi mejami. b) Izkušnjah pri implementaciji naštetih znanstvenih dosežkov v simulacijske sisteme, ki se uporabljajo v industriji in v velikih mednarodnih raziskovalnih centrih. Na podlagi prostorskega in časovnega povprečenja smo v izboljšani fizikalni modeli vključevali gibanje razpršenih trdnih delcev v sistemih plin-tekočina, podrobnejšo simulacijo turbulence z LES in bolj zapletene konstitutivne relacije modelov trdnin. Formulacija FP je bila uporabljena za stisljiv dvofazni tok, evolucijo mikrostrukture in modeliranje širjenja razpok. EM polja so bila uporabljena na makroskopskem merilu za nadzor makroizcejanja pri strjevanju in na mikroskopskem merilu za nadzor porazdelitve delcev in pospeševanje mikro curkov. Naš brez mrežni simulacijski sistem smo nadalje razvijali zaradi natančnosti, učinkovitosti, preproste numerične vgradnje, modularnosti, podobne formulacije v 2D in 3D ter različnih možnosti avtomatskega nadzora kakovosti rezultatov. Robna brez mrežna metoda za Stokesov tok je bila nadgrajena za reševanje problemov gibljivih mej na podlagi Eulerjeve formulacije in časovno-odvisne temeljne rešitve. Brez mrežna metoda je bila oblikovana za izboljšano stabilnost in konvergenco z uporabo radialnih baznih funkcij, polinomov in metode najmanjših kvadratov. Prilagodljivost je bila razširjena na razpršeno distribucijo vozlišč in nastavitve blokovsko strukturiranih oktaedrov, v kombinaciji z implicitnim časovnim korakanjem. Simulacijski sistem je bil nadalje modificiran za visoko zmogljivo računalništvo. Naštete dopolnitve so omogočile konkurenčni razvoj vrhunskih tehnologij na podlagi lastnih simulacijskih orodij. Gonilna sila dopolnitev je bila potreba pri celoviti simulaciji vertikalnega kontinuirnega ulivanja in sistemov za dostavo vzorcev v femtosekundni kristalografiji. Raziskave so prispevale k nadaljnjemu razvoju eksperimentalno podprtega temeljnega znanja na podlagi inovativnih brez mrežnih večnivojskih in večfizikalnih sistemov. Razvito temeljno znanje bo uporabljeno pri simulaciji različnih naravnih in tehnoloških procesov.

EN

The research project's scientific goals focused on enhancing the physical modelling capabilities and further developing meshless methods for solid and fluid mechanics of multiphase systems in the presence of electromagnetic (EM) fields. The project is based on: a) Further development of our following results: pioneering demonstration of coupled temporal and spatial adaptivity based on quadtree manipulation of scattered data, novel multilevel techniques for fast solution of systems of equations arising from meshless discretisations, novel techniques for stabilisation of convection dominated problems, novel meshless solvers for solution of non-Newtonian fluids, compressible flow, turbulence based on the large eddy simulation (LES), phase-field (PF) simulation of microstructure evolution, 3D simulation of magnetohydrodynamics, modelling of Stokes flow problems with free boundaries. b) Experience in implementing the listed scientific achievements in simulation systems used in industry and large international research centres. Based on spatial and temporal averaging, the improved physical models have included movement of the dispersed solid particles in gas-liquid systems, more detailed LES turbulence and more involved constitutive relations of solid mechanics models. The PF formulation has been used for compressible two-phase flow, microstructure evolution and crack propagation modelling. The EM field has been used on the macroscopic level to control the macrosegregation in solidification and on the microscopic level to control the particles' distribution and accelerate the micro-jets. Our meshless simulation system has been developed further due to accuracy, efficiency, simple numerical implementation, modularity, a similar formulation in 2D and 3D and different possibilities of automatically controlling the quality of the results. The boundary meshless method for Stokes flow has been upgraded to solve moving-boundary problems by combining the Euler-Lagrange formulation with the transient fundamental solution. The meshless method has been formulated for enhanced stability and convergence using radial basis functions, polynomials and least-squares. The adaptivity has been extended to scattered node distribution and block-structured octree setting, combined with the implicit time-stepping formulation. The simulation system has been further modified for high-performance computing. These upgrades have enabled the development of technologies based on our own simulation tools. The driving force behind the upgrades is the need to develop a simulation of vertical continuous casting of steel and sample delivery systems for femtosecond crystallography. The study has gained experimentally verified basic knowledge on the simulation of cutting-edge meshless technologies of multiscale and multiphysics systems. The upgraded basic knowledge will be used to simulate various processes in nature and technology.

3. Poročilo o uresničitvi predloženega programa dela oziroma ciljev na raziskovalnem projektu (v kolikor gre za mednarodni projekt, prikažite prispevek/cilje tujega partnerja ter kako so le-ti usklajeni s slovenskim delom projekta)

Vsebina projekta je bila organizirana v naslednje delovne pakete:

1) Izboljšanje fizikalnih modelov, 2) Napredek razvoja brez mrežnih metod, 3) Umetna inteligenca, 4) Eksperimentalne metode, verifikacija in validacija.

Ad 1) Brez mrežni simulacijski sistem smo dopolnili: s hidrodinamiko gladkih delcev (ID127806979) in ga uporabili za večfizični sistem, dopolnili za računanje stisljivih tokov (ID114950951, ID207754243) na podlagi PISO algoritma, dopolnili za računanje dvofaznih tokov (ID1717090179) na podlagi podobnočne robne formulacije z metodo fundamentalnih rešitev. Močno brez mrežno formulacijo smo uporabili za izračun Stokesovega toka na podlagi posebne formulacije, ki vsebuje nestisljiv tok (ID99503875). V model strjevanja smo vključili gibanje trdne faze (ID153238787).

Ad 2) Inovativno smo povezali robno brez mrežno metodo z območno brez mrežno metodo za učinkovito in prilagodljivo računanje dendritske rasti (ID154935811). Obe metodi smo prilagodili za računanje v superračunalniškem okolju. Lokalno brez mrežno metodo na podlagi kolokacije za radialnimi baznimi funkcijami smo usposobili za modeliranje turbulentnih tokov na podlagi simulacije velikih vrtincev (ID24844083). Naše brez mrežne simulacije smo dopolnili za računanje elasto-plastičnosti (ID168587267, ID26369811) in visko-plastičnosti (ID201503491). Močno formulirano lokalno brez mrežno metodo smo prvič uporabili za simulacijo rasti razpok. Pri tem smo uporabili fazno polje četrtega reda (ID213966083, ID235555843, ID259597059). Izdelali smo posebno časovno integracijo difuzijskih problemov z izvori (ID2183222947). Primerjali smo formulaciji na podlagi multikvadranih radialnih baznih funkcij in poliharmonskih zlepkov (ID189462019). Napisali smo pregledni članek o numeričnih metodah za dinamiko tekočin (ID179199747)

Ad 3) Dosežke 1 in 2 smo vgradili v naša simulacijska sistema za simulacijo procesiranja aluminijevih zlitin in jekel ter sisteme preuredili tako, da lahko komunicirajo z optimizacijskimi algoritmi na podlagi nevronske mreže in genetskega programiranja. To je podrobneje opisano v zaključnem poročilu projekta L2-3173.

Ad 4) Bistveno smo izboljšali eksperimentalne kapacitete Laboratorija za dinamiko fluidov in termodinamko ter laboratorij opremili s PIV tehniko ter ultra hitro kamero. Izdelali smo meritve plinsko fokusiranih curkov, dvojno plinsko fokusiranih curkov na področju Reynoldsovih in Webrovih števil, ki še niso bili eksperimentalno obravnavani. Izvedli smo več kot 200 meritev curkov iz šob velikosti okoli 1 mm in izdelali nove korelacije za debelino in dolžino curkov iz teh šob (poslano v objavo v Int. J. Multiphase Flow).

Na podlagi novih teoretičnih, numeričnih in eksperimentalnih dosežkov, pridobljenih v okviru projekta, smo izdelali:

4.a) Časovno nepovezani model vertikalnega polkontinuirnega ulivanja (ID157353987) in časovno povezani model vertikalnega polkontinuirnega ulivanja jekla (ID169294083) za največjo tovrstno livno napravo na svetu (ID166640899).

(https://www.danieli.com/en/news-media/news/1600-mm-dia-cfhi-contracts-danieli-world-s-largest-bloom-caster_37_804.htm)

Izsledke projekta bomo v dogovoru s podjetjem Danieli, ki je sofinanciralo aplikacijo projekta J2-4477 v industrijo, publicirali po zaključku instalacije livne naprave v Qiqihar, Kitajska, v drugi polovici 2026, ko bo naprava prevzeta od naročnika.

4.b) Simulacijo mikro-curkov, kjer smo upoštevali ne-Newtonske tekočine (ID168605443), pospeševanje z električnim poljem (ID138668547) ter izdelali prvo simulacijo mikro-curkov, kjer smo simulirali vse načine delovanja mikro-šobe: curek, kapljanje in opletanje (ID183506435).

Projekt smo izvajali v okviru programske skupine P2-0162 Večfazni sistemi (vodja prof. dr. Božidar Šarler, 2022-2027).

Ob projektu sta potekala dva spremljajoča podoktorska projekta Z2-2640-2020 Razvoj naprednih brez mrežnih metod za modeliranje predelave kovin na visokozmogljivih računalnikih (vodja doc. dr. Boštjan Mavrič, 2021-2024) in Z2-4479-2022. Napredno brez mrežno modeliranje in simulacija razvoja mikrostrukture za vrhunske kovinske izdelke (vodja dr. Tadej Dobravec, 2022-2024).

V okviru mednarodnega sodelovanja smo intenzivno sodelovali v projektu, direktno financiranem z Helmholtz Association, DESY, Hamburg: Innovative methods for imaging with the use of X-ray free-electron laser (XFEL) and synchrotron sources: simulation of gas-focused micro-jets, ter Cluster of Excellence "CUI: Advanced Imaging of Matter", Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)-EXC 2056-projekt ID390715994.

Delo na projektu J2-4477 je bilo prepleteno z delom na spremljajočih projektih. Številne publikacije, h katerim je bistveno pripomogel projekt J2-4477 (tudi do 45%), smo navedli pri referencah naštetih spremljajočih projektov.

Izsledke temeljnega projekta J2-4477 smo prenašali v tri aplikativne projekte ARIS: L2-2609 Simulacije vročega valjanja za proizvodnjo jekel vrhunskih kvalitiet (vodja dr. Umut Hanoglu, 2022-2024), ter L2-3173 Napredna simulacija in optimizacija celotne procesne poti za izdelavo vrhunskih jekel (vodja prof. dr. Božidar Šarler, 2022-2025), sofinancirane s strani Štore-Steel (www.store-steel.si), enega največjih proizvajalcev vzmetnega jekla, ter v sodelovanje s svetovno največjim proizvajalcem opreme za jeklarsko industrijo Danieli iz Buttria, Italija (www.danieli.com), na področju simulacij nove tehnologije vertikalnega polkontinuirnega ulivanja jekel največjih ulitkov (premer 1,6 m in dolžina 12,5 m). L2-60142 Naslednja generacija brez mrežnih metod za napredne simulacije procesiranja jekla (vodja doc.dr. Boštjan Mavrič), sofinancer Danieli Automation.

S tem multinacionalnim podjetjem smo decembra 2025 podpisali pogodbo o dolgoročnem sodelovanju na razvoju brez mrežnih metod za metalurške procese. https://www.linkedin.com/posts/danieli-digi-met_danieli-automation-digimet-is-announcing-activity-7422573265191174144-3PmK/

V okviru projekta smo predstavili več plenarnih predavanj: I.) s področja naših simulacij sistemov za dostavo vzorcev v sinhrotrone in laserje na proste elektrone na 25. International Conference on Computer Methods in Mechanics (ID164547587), II.) brez mrežnem modeliranju večfaznih sistemov na 9. International Conference on Modelling, Simulation and Applied Optimization (ID158605315) ter na Mini-Symposium on Meshless Methods, August 5, 2022, Institute of Aerospace, Nanchang University, China (ID118115587).

V okviru projekta smo zelo uspešno organizirali konferenco Eurotherm, ki je privabila 350 udeležencev iz 35 držav. www.eurotherm2024.si. Na konferenci Eurotherm je prof. Šarler predstavil predavanje "Reflections at some achievements in the field of thermofluid sciences related to Slovenians and Slovenia". Pri založbi Fakultete za strojništvo Univerze v Ljubljani je izšla zbirka povzetkov (ID198029827), pri založbi IOP pa članki. (ID197654787). Zaradi uspešne organizacije konference Eurotherm je prof. Šarler dobil naziv Kogresni ambassador Slovenije.

<https://www.bled.si/en/information/business-pages/news/2025102711524941/prof-dr-bozidar-sarler-awarded-the-title-of-congress-ambassador-of-slovenia-2025/>

V okviru projekta smo dopolnjevali Bibliografijo o Stefanovih problemih (ID123110915), katere nova verzija bo izšla ob koncu 2026.

V okviru projekta je prof. Božidar Šarler skupaj z dr. Sašo Bajt organiziral posebno sekcijo na konferenci Coupled Problems 2025, Villasimius, Sardinija, 25.-28. maj 2025 (ID240402435, ID240568579, ID245446403, ID 245446403, ID246151683).

V okviru projekta sta končala magistrsko nalogo Marušič Filip na simulacijah defomacije hiperelastičnega tesnila pod vplivom vodnega curka z brez mrežno metodo hidrodinamike gladkih delcev (ID240547843) ter Gruden Andraž na podlagi simulacije razpršenih industrijskih curkov (ID246928387) za podjetje Salonit Anhovo. Na področju simulacije makroizcejanja z gibanjem trdne faze je magistriral Viktor Govže (ID195156995).

V okviru projekta sta končala podiplomsko izobraževanje dr. Rana Khush Bakhat (izračun stisljivega dvofaznega toka na podlagi brez mrežnih metod (ID224913923) in dr. Gašper Vuga (termomehanika na podlagi brez mrežnih metod) (ID132635395).

V okviru projekta smo sodelovali z gospodarskimi družbami Salonit Anhovo, Štore Steel, Impol Slovenska Bistrica, ter z največjimi svetovnimi proizvajalci metalurške opreme Danieli s.p.a. in Danieli Automation, Butrio, Italija.

V okviru projekta smo objavili skupno 20 člankov v revijah in na konferencah. Pri tem so sodelovali kolegi/kolegice iz ZDA, Nemčije, Poljske, Portugalske, Velike Britanije, Črne Gore, Kitajske, Italije.

4. Ocena stopnje uresničitve programa dela raziskovalnega projekta in zastavljenih ciljev (v kolikor gre za mednarodni projekt, prikažite prispevek tujega partnerja/ cilje tujega partnerja ter kako so le-ti usklajeni s slovenskim delom projekta)

Program temeljnega projekta smo v celoti uresničili. Bistveno smo dopolnili modele mehanike trdnin in tekočin ter elektromagnetnega polja, ki smo jih izračunavali z novo razvitimi brez mrežnimi računskimi postopki. Izsledke smo uspešno uporabili v številnih vrhunskih tehnologijah od mikrocurkov do največjih livnih naprav.

5. Spremembe programa dela raziskovalnega projekta oziroma spremembe sestave projektne skupin

Program dela je ostal enak. Upokojila sta se doc. dr. Matjaž Perpar (2024) in dr. Zlatko Rek (2025).

6. Najpomembnejši dosežki projektne skupine na raziskovalnem področju

Naslov (Title) SLO

Izboljšana metoda končnih razlik za simulacijo dendritskega strjevanja z modelom faznega polja

Naslov (Title) EN

Improved finite difference method for phase-field modelling of dendritic solidification

Opis (Description) SLO

Ta članek predstavlja nov numerični pristop za reševanje modelov faznega polja za dendritsko strjevanje v 3-D. Tradicionalni pristopi, ki uporabljajo metode končnih razlik ali končnih elementov, pogosto povzročijo z diskretizacijo povzročeno anizotropijo pri simulaciji rasti dendritov z metodo faznega polja, kar je še posebej opazno pri nizkih vrednostih anizotropije površinske energije in zahtevajo prilagoditve parametrov modela faznega polja. Naša študija prikazuje učinkovito zmanjšanje z diskretizacijo povzročene anizotropije brez spreminjanja parametrov modela faznega polja, kar dosežemo z uporabo posplošene metode končnih razlik (PMKR) z dovolj velikimi lokalnimi podpornimi domenami. Pokažemo, da lahko PMKR uporablja večje razmake med vozlišči kot metoda končnih razlik in posledično večje časovne korake v eksplicitnih časovnih integracijskih shemah, kar ublaži povečano računsko zahtevnost zaradi potrebe po večjih lokalnih podpornih domenah. PMKR temelji na polinomski aproksimaciji z obteženimi najmanjšimi kvadrati v lokalnih podpornih domenah. Čeprav se PMKR običajno uporablja v primeru razmetanih porazdelitev vozlišč, v našem delu uporabimo standardno enakomerno regularno porazdelitev vozlišč. Ugotovitve te študije je zato mogoče neposredno uporabiti pri kateremkoli modeliranju z metodo faznega polja, ki uporablja metodo končnih razlik, tako, da preprosto povečamo velikosti lokalnih podpornih domen in posodobimo koeficiente končnih razlik. Učinkovitost novega numeričnega postopka ocenimo s simulacijami rasti dendritov v podhlajeni čisti talini, pri čemer spreminjamo jakost anizotropije površinske energije. Poleg tega preučimo, kako nelinearno predpogojevanje modela faznega polja izboljša računsko učinkovitost. Visoko računsko zahtevnost simulacij z metodo faznega polja zmanjšamo z uporabo prostorsko-časovnega prilagodljivega algoritma na osnovi osmiškega drevesa.

Opis (Description) EN

This paper introduces a novel numerical approach for solving phase-field models of dendritic solidification in 3-D. Traditional approaches utilising finite difference or finite element methods often introduce discretisation-induced anisotropy in the phase-field modelling of dendrite growth, particularly noticeable at low surface energy anisotropy strengths, necessitating adjustments to phase-field model parameters. Our study demonstrates an effective reduction of discretisation-induced anisotropy without altering phase-field model parameters, achieved by employing the generalised finite difference method (GFDM) with sufficiently large local support domains (stencils). We show that the GFDM can employ larger node spacings than the finite difference method and, therefore, larger time steps in the explicit time marching schemes, mitigating the increased computational cost due to the requirement for larger stencils. The GFDM is based on the polynomial weighted least squares approximation in the local support domains. Although the GFDM is usually applied to scattered node distributions, we apply the standard uniform regular distribution of nodes; hence, the insights of the current study can be straightforwardly applied to any phase-field modelling utilising the finite difference method by simply increasing the stencil size and updating the finite difference coefficients. The efficacy of

the novel numerical procedure is assessed through simulations of dendrite growth in a supercooled pure melt, varying the strength of surface energy anisotropy. Additionally, we test how the nonlinear preconditioning of the phase-field model enhances computational efficiency. We mitigate the high computational cost of phase-field simulations by employing an octree-based space-time adaptive algorithm.

Objavljeno v (Published in)

Elsevier; Journal of computational physics; 2026; [Article no.] 114716; str. 1-46; Impact Factor: 3.800; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 1.700; A': 1; A": 1; WoS: EV, UR ; Avtorji/Authors: Dobravec Tadej, Mavrič Boštjan, Šarler Božidar; ISSN: 0021-9991;

COBISS ID

267350019

Leto

2026

Tipologija (Tipology)

1.01 - Izvirni znanstveni članek (Original Scientific Article)

Naslov (Title) SLO

Nov prostorsko-časovni kolokacijski reševalnik za neustaljeno difuzijo v dolgem časovnem okviru s časovno spremenljivimi izvornimi členi

Naslov (Title) EN

A novel spatial-temporal collocation solver for long-time transient diffusion with time-varying source terms

Opis (Description) SLO

V tem članku je predstavljen nov prostorsko-časovni kolokacijski reševalnik za reševanje 2D in 3D difuzijskih problemov v dolgem časovnem okviru z izvornimi členi, ki se spreminjajo v času. V predstavljenem kolokacijskem reševalniku se za aproksimacijo rešitev časovno odvisnih difuzijskih enačb uporablja vrsta polanalitičnih prostorsko-časovnih fundamentalnih rešitev, pri čemer je potrebna le diskretizacija začetnih in robnih pogojev v vozliščih. Ta pristop se izogne numeričnim inverznim Laplaceovim/Fourierovim transformacijam ali izbiri dolžine časovnega koraka, značilnim za tradicionalne metode časovne diskretizacije (Laplaceove/Fourierove transformacije in časovne sheme itd.). Za obravnavo s časovno spremenljivimi izvornimi členi je dosežena razširitev metode večkratne recipročnosti iz prostorske domene v prostorsko-časovno domeno, kar nehomogeno vodilno enačbo pretvori v parcialno diferencialno enačbo višjega reda preko vrste diferencialnih operatorjev, brez potrebe po dodatni diskretizaciji v prostorsko-časovni domeni. Numerični primeri potrjujejo izvedljivost, učinkovitost in natančnost predlaganega reševalnika.

Opis (Description) EN

In this paper, a novel spatial-temporal collocation solver is proposed for the solution of 2D and 3D long-time diffusion problems with source terms varying over time. In the present collocation solver, a series of semi-analytical spatial-temporal fundamental solutions are used to approximate the solutions of the time-dependent diffusion equations with only the node discretization of the initial and boundary conditions. This approach avoids the numerical inverse Laplace/Fourier transformations or the selection of the time-step size in the traditional time discretization methods (Laplace/Fourier transformations and time-stepping scheme, etc.). To treat with the time-varying source terms, an extension of the multiple reciprocity method from the spatial domain to the spatial-temporal domain is achieved, which converts the nonhomogeneous governing equation into a high-order partial differential equation via a series of differential operators without the need for additional discretization in the spatial-temporal domain. Several numerical examples validate the feasibility, efficiency and accuracy of the proposed solver.

Objavljeno v (Published in)

Elsevier; Engineering analysis with boundary elements; 2025; #Vol. #171, [art. no.] 106060; str. 1-10; Impact Factor: 4.100; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.100; A': 1; WoS: IF, PO ; Avtorji/Authors: Xu Wenzhi, Fu Zhuojia, Xi Qiang, Liu Qingguo, Šarler Božidar; ISSN: 0955-7997;

COBISS ID

218322947

Leto

2025

Tipologija (Tipology)

1.01 - Izvirni znanstveni članek (Original Scientific Article)

Naslov (Title) SLO

Naslov (Title) EN

Meshless large-eddy solution of turbulent flow

Opis (Description) SLO

Obračunan je turbulentni tok Newtonove nestisljive tekočine v dveh dimenzijah. Parcialne diferencialne enačbe, ki opisujejo ohranitev mase in gibalne količine, so rešene z brez mrežno metodo močne oblike z uporabo lokalne kolokacijske metode z multikvadrnimi radialnimi baznimi funkcijami na pet-točkovni poddomeni in eksplicitnim časovnim korakom. Za sklopitev tlaka in hitrosti je uporabljena metoda delnih korakov. Gibanje turbulentne tekočine je opisano z metodo velikih vrtincev (LES), Smagorinsky-Lilly modelom za izračun turbulentne viskoznosti in Van Driestovo dušilno funkcijo. Nova uporaba opisanega numeričnega pristopa je temeljito preizkušena na toku skozi kanal in toku čez nazaj obrnjeno stopnico. Simulacije so sistematično ocenjene s primerjavo metode velikih vrtincev na rezultatih brez mrežne metode z rezultati standardne metode končnih volumnov za $Re=5000$. Poleg tega je bila za rešitve s postopkom brez mrežne metode narejena parametrična študija vpliva širine filtra, učinkovitih razdalj, uporabljenih za izračun širine filtra, in Smagorinsky konstante. Pridobljeni rezultati se ujemajo z referenčnimi rezultati, kar potrjuje primernost razvite brez mrežne rešitve za reševanje problemov turbulentnega toka tekočin na podlagi LES formulacije. Študija je odprla pot za uporabo opisanega pristopa pri bolj zapletenih industrijskih problemih toka tekočin.

Opis (Description) EN

A turbulent flow of Newtonian incompressible fluid in two dimensions is considered. The partial differential equations describing the conservation of mass and momentum are solved by a strong-form meshless method using five-noded local collocation with multiquadric radial basis functions and explicit time-stepping. The fractional step method is used for the pressure-velocity coupling. The large-eddy simulation (LES) model, the Smagorinsky-Lilly model for calculating turbulent viscosity, and the Van Driest damping function describe the turbulent motion of the fluid flow. The novel application of the described numerical approach is thoroughly tested on a channel flow and backward-facing step flow. The simulations are systematically assessed by comparing the meshless results with standard finite-volume method large-eddy simulation results for $Re=5000$. Additionally, the parametric study and the influence of the filter width, effective distances used to calculate filter width, and the Smagorinsky constant were assessed for the meshless solution procedure. The obtained results agree with the reference results, approving the suitability of the developed meshless solution for solving turbulent fluid flow problems based on LES formulation. The study has opened the way for using the described approach in more complicated industrial fluid flow problems.

Objavljeno v (Published in)

Elsevier; Engineering analysis with boundary elements; 2025; #Vol. #179, #part. #A, [article no.] 106431; 13 str.; Impact Factor: 4.100; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.100; A¹: 1; WoS: IF, PO ; Avtorji/Authors: Mramor Katarina, Zahoor Rizwan, Vertnik Robert, Šarler Božidar; ISSN: 1873-197X;

COBISS ID

248440835

Leto

2025

Tipologija (Tipology)

1.01 - Izvirni znanstveni članek (Original Scientific Article)

Naslov (Title) SLO

Brez mrežna rešitev širjenja razpoke v krhkem elastičnem materialu pri strižni, tlačni in natezni obremenitvi

Naslov (Title) EN

Meshless solution of the crack propagation in brittle elastic material under shear, compressible and tensile loading

Opis (Description) SLO

Študija raziskuje robustno in računsko učinkovito dvodimenzionalno metodo za modeliranje širjenja razpok z metodo faznega polja pri nateznih, tlačnih in strižnih obremenitvah, pri čemer se uporablja brez mrežna kolokacijska metoda z lokalnimi radialnimi baznimi funkcijami (LKMRBF). Mehanski model temelji na krhkem elastičnem materialu, širjenje razpok pa je opisano s četrto-vrstno fazno-poljsko enačbo, ki je reševana v zaporednih korakih. Za prvo uporabo pri LKMRBF se uporablja metoda spektralne razdelitve tenzorskega polja krhkega elastičnega materiala za širjenje razpok. To zagotavlja, da se razpoke fizično

pravilno širijo pod različnimi tipi obremenitev, kar zapolnjuje vrzel iz naše prejšnje študije, kjer je bilo širjenje razpok mogoče le pri nateznih obremenitvah. LKMRBF v močni obliki je konstruiran na 13-vozelnih poddomenah z nadgrajenimi tretje-rednimi poliharmonskimi oblikovnimi funkcijami. Uveden je nov kriterij prilagodljive velikosti koraka obremenitve, ki poveča računsko učinkovitost z odstranitvijo zahtevnih notranjih iteracijskih procesov. Učinkovitost metode je ovrednotena na treh referenčnih testih, ki so izpostavljeni kombiniranim nateznim, strižnim in tlačnim obremenitvam. Rezultati so validirani z referenčnimi rešitvami glede natančnosti in hitrosti konvergence za razpršene in regularne razporeditve vozlov. Prikazani so tudi učinki iterativnih in ne-iterativnih procesov pri različnih velikostih korakov obremenitve.

Opis (Description) EN

This study explores a robust and computationally efficient two-dimensional solution procedure for phase-field modelling of crack propagation under tensile, compressive, and shear loadings by using the meshless local radial basis function collocation method (LRBFCM). The mechanical model is based on the brittle elastic material, and the crack propagation is governed by the fourth-order phase field equation coupled in a staggered way. The spectral-split method for strain tensor decomposition of a brittle elastic material is used with LRBFCM for crack propagation for the first time. It ensures that the crack is propagated physically correctly under different loading types, filling the gap in our previous study [1], where crack propagation only under tensile loading was possible. The strong-form LRBFCM is constructed on 13-noded subdomains with augmented third-order polyharmonic spline shape functions. A novel adaptive loading step size criterion is introduced to increase computational efficiency by removing cumbersome internal iteration processes. The method's performance is assessed with three benchmark tests subjected to mixed-mode tension, shear and compressive loading. The results are validated with the reference solutions regarding accuracy and convergence rates for scattered and regular node arrangements. The effects of the iterative and non-iterative processes with different loading step sizes are shown.

Objavljeno v (Published in)

Elsevier; Engineering fracture mechanics; 2025; #Vol. #323, [article no.] 111207; 26 str.; Impact Factor: 5.300; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.900; A: 1; WoS: PU ; Avtorji/Authors: Ali Izaz, Vuga Gašper, Mavrič Boštjan, Šarler Božidar; ISSN: 1873-7315;

COBISS ID

23555843

Leto

2025

Tipologija (Tipology)

1.01 - Izvirni znanstveni članek (Original Scientific Article)

Naslov (Title) SLO

Učinkovito brez mrežno modeliranje širjenja razpok z metodo faznega polja ter uporabo prilagodljivih inkrementov obremenitve in spremenljive gostote vozlišč

Naslov (Title) EN

Efficient meshless phase-field modeling of crack propagation by using adaptive load increments and variable node densities

Opis (Description) SLO

Ta študija uporablja metodo faznega polja (PFM) četrtega reda za preučevanje širjenja razpok. PFM terja znatne računске stroške zaradi potrebe po zelo gosti razporeditvi vozlišč za natančno sledenje širjenju razpok. V tem delu je predlagana strategija prilagodljive velikosti korakov obremenitve, kombinirana z razmetano razporeditvijo vozlišč (SCNvar) s spremenljivimi razmiki. Mehanski model in model faznega polja sta rešena z uporabo brez mrežne lokalne kolokacijske metode radialnih baznih funkcij v močni obliki, pri čemer se uporablja zamaknjeni pristop. Učinkovitost metode je ovrednotena na podlagi natančnosti in računskih stroškov z uporabo regularnih vozlišč (RGN) in razmetanih vozlišč z enakomernim razmikom (SCNuni), kakor tudi razmetanih vozlišč s spremenljivim razmikom (SCNvar). Za analizo predlagane metode sta uporabljena dva testna primera: natezni preizkus z dvema simetričnima zareza in strižni preizkus z eno zarezo. Analiza pokaže, da strategija prilagodljive velikosti korakov izboljša numerično stabilnost, medtem ko SCNvar znatno zmanjša računске stroške. Z uporabo SCNvar se čas izvajanja (CPU) zmanjša za približno tridesetkrat v nateznem primeru in za približno trikrat v strižnem primeru, ne da bi se pri tem zmanjšala natančnost. To potrjuje, da lahko usmerjanje računskih virov v kritična območja bistveno zmanjša čas izvajanja, kar nakazuje, da bi prilagodljiva prerazporeditev vozlišč lahko še dodatno izboljšala računsko učinkovitost.

Opis (Description) EN

This study employs the fourth-order phase-field method (PFM) to investigate crack propagation. The PFM incurs significant computational costs due to its need for a highly dense node arrangement for accurate crack propagation. This study proposes an adaptive loading step size strategy combined with a scattered node (SCN_{var}) arrangement with variable spacings. The mechanical and phase-field models are solved using the strong-form meshless local radial basis function collocation method in a staggered approach. The method's performance is evaluated based on accuracy and computational cost, using regular nodes (RGN) and scattered nodes (SCN_{uni}) with uniform spacing, as well as SCN_{var} with variable node spacing. Two benchmark tests are used to analyze the proposed method: a symmetric double-notch tension and a single-edge notch shear test. The analysis shows that the adaptive step size strategy improves numerical stability while the SCN_{var} significantly reduces computational cost. Using SCN_{var}, the CPU time is decreased by about thirty times compared to uniform nodes in the tensile case and by approximately three times in the shear case, without sacrificing accuracy. This confirms that directing computational resources to critical regions can significantly reduce CPU time, suggesting that adaptive node redistribution could further enhance computational performance.

Objavljeno v (Published in)

MDPI AG; Mathematics; 2025; #Vol. #13, #issue #23, [article no.] 3795; 18 str.; Impact Factor: 2.200; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 0.900; A: 1; WoS: PQ; Avtorji/Authors: Ali Izaz, Šarler Božidar, Mavrič Boštjan; ISSN: 2227-7390;

COBISS ID

259597059

Leto

2025

Tipologija (Tipology)

1.01 - Izvirni znanstveni članek (Original Scientific Article)

Naslov (Title) SLO

Izboljšana lokalna metoda radialnih baznih funkcij za reševanje elasto-plastičnosti v okviru majhnih deformacijah

Naslov (Title) EN

An improved local radial basis function method for solving small-strain elasto-plasticity

Opis (Description) SLO

Brezmrežne metode v močni obliki so v zadnjih letih pritegnile veliko pozornosti ter se obsežno raziskujejo in uporabljajo pri širokem spektru problemov v znanosti in inženirstvu. Izkazalo se je, da je reševanje elasto-plastičnih problemov zahtevno, predvsem zaradi pogosto nekladnih konstitutivnih relacij med napetostjo in deformacijo. Novost pri njihovem obravnavanju je uvedba virtualnih končnih diferenčnih shem za formulacijo hibridne metode končnih diferenc, generirane z radialnimi baznimi funkcijami (KD-RBF), ki je v tem delu prvič uporabljena za reševanje elasto-plastičnosti po von Misesu pri majhnih deformacijah. V članku je nova metoda nadalje primerjana z dvema alternativnima obstoječima pristopoma KD-RBF, ki pri uporabi na tem razredu problemov odpove. Trije pristopi se razlikujejo v diskretizaciji operatorja divergence v ravnovesni enačbi, ki deluje na nekladno polje napetosti. Poleg tega je uporabljena inovativna stabilizacijska tehnika za stabilizacijo robnih pogojev, za katero se izkaže, da je ključna za uspešno konvergenco kateregakoli izmed pristopov. Pristopi so ovrednoteni na elastičnih in elasto-plastičnih referenčnih primerih, pri čemer so preučeni dopustni intervali na novo uvedenih prostih parametrov z vidika stabilnosti, natančnosti in hitrosti konvergence.

Opis (Description) EN

Strong-form meshless methods received much attention in recent years and are being extensively researched and applied to a wide range of problems in science and engineering. However, the solution of elasto-plastic problems has proven to be elusive because of often non-smooth constitutive relations between stress and strain. The novelty in tackling them is the introduction of virtual finite difference stencils to formulate a hybrid radial basis function generated finite difference (RBF-FD) method, which is used to solve small-strain von Mises elasto-plasticity for the first time by this original approach. The paper further contrasts the new method to two alternative legacy RBF-FD approaches, which fail when applied to this class of problems. The three approaches differ in the discretization of the divergence operator found in the balance equation that acts on the non-smooth stress field. Additionally, an innovative stabilization technique is employed to stabilize boundary conditions and is shown to be essential for any of the approaches to converge successfully. Approaches are assessed on elastic and elasto-plastic benchmarks where admissible ranges of newly introduced free parameters are studied regarding

stability, accuracy, and convergence rate.

Objavljeno v (Published in)

Elsevier; Computer methods in applied mechanics and engineering; 2024; #Vol. #418, #pt. #A; str. 1-28; Impact Factor: 7.300; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.100; A¹: 1; WoS: PO, PU, IF ; Avtorji/Authors: Vuga Gašper, Mavrič Boštjan, Šarler Božidar; ISSN: 0045-7825;

COBISS ID

168587267

Leto

2024

Tipologija (Tipology)

1.01 - Izvirni znanstveni članek (Original Scientific Article)

Naslov (Title) SLO

Metoda temeljnih rešitev za dvofazni Stokesov tok

Naslov (Title) EN

Formulation of the method of fundamental solutions for two-phase Stokes flow

Opis (Description) SLO

Metoda temeljnih rešitev s tehniko podobmočij je uporabljena za rešitev problema proste meje, povezanega z dvofaznim Stokesovim tokom v 2D geometriji. Postopek reševanja temelji na kolokaciji robnih pogojev s temeljno rešitvijo Stokesove enačbe. Formuliran je za pretok tekočin v stiku, ki se med seboj ne mešajo. Določiti je treba hitrost, tlačno polje in položaj proste meje med tekočinama. Standardna formulacija metode temeljnih rešitev je prvič nadgrajena za primer z mešanimi robnimi pogoji hitrosti in tlaka ter validirana na T-razdelilniku enofaznega toka z nesimetričnimi robnimi pogoji tlaka. Za referenčno rešitev je uporabljena metoda kontrolnih volumnov. Natančno vrednotenje odvodov hitrosti, ki so potrebni za izračun ravnotežja sil na prosti meji med tekočinama, je v nasprotju s prejšnjimi numeričnimi poskusi doseženo v zaprti obliki. Izdelan je algoritem za iterativno izračunavanje položaja proste meje, ki vključuje premik, glajenje in premeščanje vozlišč. Postopek je preverjen za sočasni tok dveh tekočin v kanalu. Hitrost in odvodi hitrosti kažejo hitro konvergenco k analitični rešitvi. Razvita robna brez mrežna metoda je preprosta za kodiranje, natančna in računsko učinkovita, saj je potrebna samo kolokacija na fiksnih in prostih mejah.

Opis (Description) EN

The method of fundamental solutions with a subdomain technique is used for the solution of the free boundary problem associated with a two-phase Stokes flow in a 2D geometry. The solution procedure is based on the collocation of the boundary conditions with the Stokeslets. It is formulated for the flow of unmixing fluids in contact, where the velocity, pressure field, and position of the free boundary between the fluids must be determined. The standard formulation of the method of fundamental solutions is, for the first time, upgraded for the case with mixed velocity and pressure boundary conditions and verified on a T-splitter single-phase flow with unsymmetric pressure boundary conditions. The standard control volume method is used for the reference solution. The accurate evaluation of the velocity derivatives, which are required to calculate the balance of forces at the free boundary between the fluids, is achieved in a closed form in contrast to previous numerical attempts. An algorithm for iteratively calculating the position of the free boundary that involves displacement, smoothing and repositioning of the nodes is elaborated. The procedure is verified for a concurrent flow of two fluids in a channel. The velocity and velocity derivatives show fast convergence to the analytical solution. The developed boundary meshless method is easy to code, accurate and computationally efficient since only collocation at the fixed and free boundaries is needed.

Objavljeno v (Published in)

Elsevier; Engineering analysis with boundary elements; 2024; #Vol. #158; str. 199-210; Impact Factor: 4.100; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.100; A¹: 1; WoS: IF, PO ; Avtorji/Authors: Rek Zlatko, Šarler Božidar; ISSN: 0955-7997;

COBISS ID

171090179

Leto

2024

Tipologija (Tipology)

1.01 - Izvirni znanstveni članek (Original Scientific Article)

Naslov (Title) SLO

Hibridna metoda radialnih baznih funkcij in končnih diferenc za modeliranje dvo-dimenzijske termo-elasto-plastičnosti, 1. del: formulacija metode in testiranje

Naslov (Title) EN

A hybrid radial basis function-finite difference method for modelling two-dimensional thermo-elasto-plasticity, Part 1

Opis (Description) SLO

V članku je predstavljena je hibridna različica brez mrežne metode v močni obliki, ki temelji na radialnih baznih funkcijah in končnih diferencah (KD-RBF), za reševanje termo-mehanskih problemov. Toplotni model je prostorsko diskretiziran z KD-RBF, pri čemer so bazne funkcije poliharmonični zleпки, razširjeni s polinomi. Za časovno diskretizacijo je uporabljena eksplicitna Eulerjeva metoda. Za reševanje mehanskih problemov je uvedena razširitev metode KD-RBF, t.i. hibridna KD-RBF. Model je enosmerno sklopljen, pri čemer temperatura vpliva na pomike. Obravnavan je termo-elasto-plastični materialni odziv, pri katerem je polje napetosti na splošno ne gladko. Prikazano je, da je hibridna KD-RBF metoda, pri kateri se metoda končnih diferenc uporablja za diskretizacijo operatorja divergence iz ravnovesne enačbe, uspešna pri obravnavi takšnih problemov. Mehanski model je predstavljen v predpostavki ravninskega deformacijskega stanja ter v posplošenem ravninskem deformacijskem stanju (PRDS). V tem delu je prvič predstavljena brez mrežna metoda KD-RBF v močni obliki za PRDS probleme, ki so podvrženi omejitvam v integralni obliki. Predlagana metoda je verificirana z vidika h-konvergence in natančnosti na referenčnem primeru segrevanja elasto-plastičnega kvadrata. Pokazano je, da je uspešna pri reševanju enosmerno sklopljenih termo-elasto-plastičnih problemov. Predlagani novi brez mrežni pristop je učinkovit, natančen in robusten. Njegova uporaba v industrijskem okolju je predstavljena v 2. delu tega članka.

Opis (Description) EN

A hybrid version of the strong form meshless Radial Basis Function-Finite Difference (RBF-FD) method is introduced for solving thermo-mechanics. The thermal model is spatially discretised with RBF-FD, where trial functions are polyharmonic splines augmented with polynomials. For time discretisation, the explicit Euler method is employed. An extension of RBF-FD, the hybrid RBF-FD, is introduced for solving mechanical problems. The model is one-way coupled, where temperature affects displacements. The thermo-elastoplastic material response is considered where the stress field is generally non-smooth. The hybrid RBF-FD, where the finite difference method is used to discretise the divergence operator from the balance equation, is shown to be successful when dealing with such problems. The mechanical model is introduced in a plane strain and in a generalised plane strain (GPS) assumption. For the first time, this work presents a strong form RBF-FD for GPS problems subjected to integral form constraints. The proposed method is assessed regarding h-convergence and accuracy on the benchmark with heating an elastoplastic square. It is proven to be successful at solving one-way coupled thermo-elastoplastic problems. The proposed novel meshless approach is efficient, accurate, and robust. Its use in an industrial situation is provided in Part 2 of this paper.

Objavljeno v (Published in)

Elsevier; Engineering analysis with boundary elements; 2024; #Vol. #159; str. 58-67; Impact Factor: 4.100; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.100; A: 1; WoS: IF, PO ; Avtorji/Authors: Vuga Gašper, Mavrič Boštjan, Šarler Božidar; ISSN: 0955-7997;

COBISS ID

174529795

Leto

2024

Tipologija (Tipology)

1.01 - Izvirni znanstveni članek (Original Scientific Article)

Naslov (Title) SLO

Brez mrežno numerično modeliranje visko-plastičnega materiala v močni obliki

Naslov (Title) EN

Strong-form meshless numerical modelling of visco-plastic material

Opis (Description) SLO

Brez mrežno numerično modeliranje visko-plastičnega materiala v močni obliki

Opis (Description) EN

This work extends our research on the strong-form meshless Radial Basis Function - Finite Difference (RBF-FD) method for solving non-linear visco-plastic mechanical problems. The polyharmonic splines with second-order polynomial augmentation are used for the shape functions. Their coefficients are determined by collocation. Three different approaches (direct, composed, and hybrid) are used for the numerical evaluation of the divergence operator in the equilibrium equation. They are presented and assessed for a visco-plastic material model with continuously differentiable material properties. It is shown that the direct approach is not suitable in this respect. In comparison to the previously investigated elasto-plasticity, it is shown that the composed approach can successfully cope with visco-plastic problems and is found to be even more accurate than the hybrid approach, which has previously proven to be most stable and effective in solving elasto-plasticity. This work extends the applicability of strong-form RBF-FD methods and opens up new areas of modelling non-linear solid mechanics.

Objavljeno v (Published in)

Elsevier; Engineering analysis with boundary elements; 2024; #Vol. #167, [art. no.] 105868; str. 1-17; Impact Factor: 4.100; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.100; A¹: 1; WoS: IF, PO ; Avtorji/Authors: Vuga Gašper, Mavrič Boštjan, Šarler Božidar; ISSN: 0955-7997;

COBISS ID

201503491

Leto

2024

Tipologija (Tipology)

1.01 - Izvirni znanstveni članek (Original Scientific Article)

Naslov (Title) SLO

Brezmrežna simulacija osno simetričnega problema Rayleigh-Taylorjeve nestabilnosti z formulacijo faznega polja

Naslov (Title) EN

Phase-field formulated meshless simulation of axisymmetric Rayleigh-Taylor instability problem

Opis (Description) SLO

Brezmrežna simulacija osno simetričnega problema Rayleigh-Taylorjeve nestabilnosti z formulacijo faznega polja

Opis (Description) EN

A formulation of the immiscible Newtonian two-liquid system with different densities and influenced by gravity is based on the Phase-Field Method (PFM) approach. The solution of the related governing coupled Navier-Stokes (NS) and Cahn-Hilliard (CH) equations is structured by the meshless Diffuse Approximate Method (DAM) and Pressure Implicit with Splitting of Operators (PISO). The variable density is involved in all the terms. The related moving boundary problem is handled through single-domain, irregular, fixed node arrangement in Cartesian and axisymmetric coordinates. The meshless DAM uses weighted least squares approximation on overlapping subdomains, polynomial shape functions of second-order and Gaussian weights. This solution procedure has improved stability compared to Chorin's pressure-velocity coupling, previously used in meshless solutions of related problems. The Rayleigh-Taylor instability problem simulations are performed for an Atwood number of 0.76. The DAM parameters (shape parameter of the Gaussian weight function and number of nodes in a local subdomain) are the same as in the authors' previous studies on single-phase flows. The simulations did not need any upwinding in the range of the simulations. The results compare well with the mesh-based finite volume method studies performed with the open-source code Gerris, Open-source Field Operation and Manipulation (OpenFOAM®) code and previously existing results.

Objavljeno v (Published in)

Elsevier; Engineering analysis with boundary elements; 2024; #Vol. #169, #Part #A, art. 105953; str. 1-14; Impact Factor: 4.100; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.100; A¹: 1; WoS: IF, PO ; Avtorji/Authors: Rana Khush Bakhat, Mavrič Boštjan, Zahoor Rizwan, Šarler Božidar; ISSN: 0955-7997;

COBISS ID	Leto	Tipologija (Tipology)
207754243	2024	1.01 - Izvirni znanstveni članek (Original Scientific Article)

Naslov (Title) SLO

Modeliranje krhkega lomljenja z metodo faznega polja četrtega reda in brez mrežno metodo v močni obliki

Naslov (Title) EN

Fourth-order phase field modelling of brittle fracture with strong form meshless method

Opis (Description) SLO

Formulacija sistema dveh nemešljivih Newtonskih kapljev in z različnima gostotama pod vplivom gravitacije temelji na pristopu metode faznega polja (PFM). Reševanje pripadajočih vodilnih sklopljenih Navier-Stokesovih (NS) in Cahn-Hilliardovih (CH) enačb je izvedeno z uporabo brez mrežne difuzijske aproksimacijske metode (DAM) ter algoritma PISO. Spremenljiva gostota je upoštevana v vseh členih enačb. Pripadajoči problem s premično mejo je obravnavan z enodomskim pristopom z nepravilno, fiksno razporeditvijo vozlišč v kartezičnih in osno simetričnih koordinatah. Brez mrežna metoda DAM uporablja aproksimacijo z uteženimi najmanjšimi kvadrati na prekrivajočih se poddomenah, polinomske oblikovne funkcije drugega reda in Gaussove uteži. Opisani postopek reševanja ima izboljšano stabilnost v primerjavi s Chorinovo sklopitvijo tlaka in hitrosti, ki je bila predhodno uporabljena v brez mrežnih rešitvah sorodnih problemov. Simulacije problema Rayleigh-Taylorjeve nestabilnosti so izvedene za Atwoodovo število 0,76. Parametri metode DAM (parameter oblike Gaussove utežne funkcije in število vozlišč v lokalni poddomeni) so enaki kot v predhodnih študijah avtorjev za enofazne tokove. V obravnavanem območju simulacij ni bila potrebna uporaba privetnih shem. Rezultati študije se dobro ujemajo z rezultati metod končnih volumnov na mrežah, izvedenih z odprtokodnimi programi Gerris in Open-source Field Operation and Manipulation (OpenFOAM®), ter s predhodno objavljenimi rezultati.

Opis (Description) EN

This study aims to find a solution for crack propagation in 2D brittle elastic material using the local radial basis function collocation method. The staggered solution of the fourth-order phase field and mechanical model is structured with polyharmonic spline shape functions augmented with polynomials. Two benchmark tests are carried out to assess the performance of the method. First, a non-cracked square plate problem is solved under tensile loading to validate the implementation by comparing the numerical and analytical solutions. The analysis shows that the iterative process converges even with a large loading step, whereas the non-iterative process requires smaller steps for convergence to the analytical solution. In the second case, a single-edge cracked square plate subjected to tensile loading is solved, and the results show a good agreement with the reference solution. The effects of the incremental loading, length scale parameter, and mesh convergence for regular and scattered nodes are demonstrated. This study presents a pioneering attempt to solve the phase field crack propagation using a strong-form meshless method. The results underline the essential role of the represented method for an accurate and efficient solution to crack propagation. It also provides valuable insights for future research towards more sophisticated material models.

Objavljeno v (Published in)

Elsevier; Engineering analysis with boundary elements; 2024; #Vol. #169, #pt #B, [art.] 106025; str. 1-14; Impact Factor: 4.100; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.100; A': 1; WoS: IF, PO ; Avtorji/Authors: Ali Izaz, Vuga Gašper, Mavrič Boštjan, Hanoglu Umut, Šarler Božidar; ISSN: 0955-7997;

COBISS ID	Leto	Tipologija (Tipology)
213966083	2024	1.01 - Izvirni znanstveni članek (Original Scientific Article)

Naslov (Title) SLO

Vrednotenje lokalne kolokacijske metode z radialnimi baznimi funkcijami za difuzijske probleme z uporabo multikvadrinov in poliharmoničnih zlepkov

Naslov (Title) EN

Assessment of local radial basis function collocation method for diffusion problems structured with multiquadrics and polyharmonic splines

Opis (Description) SLO

Prispevek sistematično ovrednoti lokalno kolokacijsko metodo z radialnimi baznimi funkcijami, oblikovano z multikvadriki (MQ) in poliharmoničnimi zlepci (PHS), za reševanje stacionarnih in nestacionarnih difuzijskih problemov. Test robne vrednosti obravnava pravokotno območje z Dirichletovimi, Neumannovimi in Robinovimi robnimi pogoji, medtem ko je test začetne vrednosti povezan s problemom skoka Dirichletovega pogoja na kvadratu. Spektri prostih parametrov metode, kot so gostota vozlišč, časovni korak, oblikovni parameter itd., so analizirani z vidika povprečne napake. Ugotovljeno je, da je uporaba MQ manj stabilna v primerjavi s PHS pri nepravilnih razporeditvah vozlišč. Za MQ je za več primerov določen najprimernejši oblikovni parameter. Podana je tudi povezava med oblikovnim parametrom ter skupnim številom vozlišč, povprečno napako, faktorjem razpršenosti vozlišč in številom vozlišč v lokalni poddomeni. Pri regularnih razporeditvah vozlišč MQ dosegajo nekoliko višjo natančnost, medtem ko pri nepravilnih razporeditvah vozlišč PHS zagotavljajo boljšo natančnost kot MQ. Za difuzijske probleme, ki zahtevajo nepravilno razporeditev vozlišč, se priporoča uporaba PHS.

Opis (Description) EN

This paper aims to systematically assess the local radial basis function collocation method, structured with multiquadrics (MQs) and polyharmonic splines (PHSs), for solving steady and transient diffusion problems. The boundary value test involves a rectangle with Dirichlet, Neuman, and Robin boundary conditions, and the initial value test is associated with the Dirichlet jump problem on a square. The spectra of the free parameters of the method, i.e., node density, timestep, shape parameter, etc., are analyzed in terms of the average error. It is found that the use of MQs is less stable compared to PHSs for irregular node arrangements. For MQs, the most suitable shape parameter is determined for multiple cases. The relationship of the shape parameter with the total number of nodes, average error, node scattering factor, and the number of nodes in the local subdomain is also provided. For regular node arrangements, MQs produce slightly more accurate results, while for irregular node arrangements, PHSs provide higher accuracy than MQs. PHSs are recommended for use in diffusion problems that require irregular node spacing.

Objavljeno v (Published in)

MDPI; Mathematical and computational applications; 2024; #Vol. #29, #iss. #2, [article no.] 23; str. 1-31; Avtorji/Authors: Ali Izaz, Hanoglu Umut, Vertnik Robert, Šarler Božidar; ISSN: 2297-8747;

COBISS ID

189462019

Leto

2024

Tipologija (Tipology)

1.01 - Izvirni znanstveni članek (Original Scientific Article)

Naslov (Title) SLO

Brezmrežna rešitev stisljivega viskoznege toka v osnosimetričnih ceveh z različnimi preseki

Naslov (Title) EN

A meshless solution of the compressible viscous flow in axisymmetric tubes with varying cross-sections

Opis (Description) SLO

Brezmrežna metoda difuznih približkov (MDP) je prvokrat zastavljena in uporabljena za simulacijo stisljivega Newtonskega toka idealnega plina v osno simetrični cevi s spremenljivim presekom. Problem je sestavljen iz sklopljenih parcialnih diferencialnih enačb za ohranitev mase, gibalne količine in energije ter ustrezne enačbe stanja. Sistem enačb je rešen v primitivnih spremenljivkah v močni obliki. MDP je formulirana na neregularni postavitvi vozlišč z uporabo oblikovnih funkcij druge in tretje stopnje ter Gaussovimi utežmi kar se odraža v obteženih problemih najmanjših kvadratov na prekrivajočih se poddomenah. Sklopitev med hitrostjo in tlakom je izvedena z metodo PISO. Rešitev z predstavljeno novo metodo je primerjana z rezultati dobljenimi z metodo končnih volumnov na fini mreži. Lastnosti brez mrežne metode MDP so preiskane sistematično s spreminjanjem gostote točk, reda oblikovnih funkcij ter oblike Gaussove uteži. Parametrična študija metode DAM je pokazala, da je za reševanje predstavljenega problema najprimernejša vrednost parametra širine utežne funkcije 10 ob uporabi 13 točk v lokalni poddomeni. Z uporabo oblikovnih funkcij tretjega reda opazimo konvergenco tretjega reda.

Opis (Description) EN

The meshless Diffuse Approximate Method (DAM) is for the first time formulated and applied to simulate the compressible Newtonian flow of an ideal gas in an axisymmetric tube with varying cross-sections. The problem is structured by coupled partial differential equations for conservation of mass, momentum and energy, and the equation of state closure. These equations are solved in primitive variables and strong form. DAM is formulated on irregular node arrangement by using the second and third-order polynomial shape functions and Gaussian weights, leading to weighted least squares approximation on overlapping local subdomains. Pressure-velocity coupling is performed by the Pressure Implicit with Splitting of Operators (PISO) scheme. The solution of the represented novel application of DAM is verified by matching the meshless results with the fine-mesh finite-volume method results. The characteristics of meshless DAM for this kind of problem are systematically assessed by a detailed investigation of the varying node density, shape function order, Gaussian weight's shape, and the number of nodes in a local subdomain. The sensitivity study of DAM parameters shows that for the tested problems, the most suitable values of the Gaussian weight function and the number of nodes in a local subdomain are 5.0 and 13, respectively. Third-order convergence rate with better results is observed while using third-order polynomial shape functions.

Objavljeno v (Published in)

Elsevier; Engineering analysis with boundary elements; 2022; #Vol. #143; str. 340-352; Impact Factor: 3.300; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.400; A': 1; WoS: PO, IF ; Avtorji/Authors: Rana Khush Bakhat, Mavrič Boštjan, Zahoor Rizwan, Šarler Božidar; ISSN: 0955-7997;

COBISS ID

114950915

Leto

2022

Tipologija (Tipology)

1.01 - Izvirni znanstveni članek (Original Scientific Article)

Naslov (Title) SLO

Brezdivergenčna brez mrežna lokalna metoda Petrov-Galerkina za Stokesov tok

Naslov (Title) EN

Divergence-free meshless local Petrov-Galerkin method for Stokes flow

Opis (Description) SLO

Stokesov tok nastopa v talini med dendritsko rastjo, zato je učinkovito reševanje tovrstnih tokov izjemno pomembno pri simulaciji procesiranja kovinskih materialov. V prispevku smo razvili povsem novo učinkovito in natančno brez mrežno rešitev Stokesovega toka v dveh dimenzijah. Omenjeno smo dosegli na podlagi uporabe Petrov-Galerkinove šibke formulacije z matrično kvadratno Matérnovo radialno bazno funkcijo brez divergence za oblikovno funkcijo in z matrično kompaktno podprto Gaussovo funkcijo brez divergence za utežno funkcijo. Uporabljena je Gauss-Legendrova integracija šibke formulacije. Enačba ohranitve mase je tako inteligentno sama po sebi vgrajena v formulacijo, tlak pa je izločen iz formulacije s pomočjo divergenčnega izreka. Razvita metoda je torej brez iteracij in rezultira v hitro-rešljivem pasovnem sistemu enačb za simultano rešitev obeh komponent hitrosti. Značilnosti metode smo ocenili s sistematičnim spreminjanjem njenih prostih parametrov. Izkaže se, da je metoda primerna za reševanje Stokesovih tokov med ogromnim številom dendritskih struktur in zato predstavlja bistven napredek pri simulacijah strjevanja. V nadaljevanju razvijamo tri-dimenzionalno verzijo metode, ki jo bomo uporabili v mezoskopskih industrijskih modelih strjevanja. Raziskava je nastala v okviru temeljnega projekta J2-1718 ARRS, ki sta ga izvajala IMT in Fakulteta ta strojništvo Univerze v Ljubljani, izšla pa je v reviji iz družine Springer Nature.

Opis (Description) EN

The purpose of the present paper is development of an efficient meshless solution of steady incompressible Stokes flow problems with constant viscosity in two dimensions, with algebraic order of accuracy. This is achieved by employing a weak formulation with divergence-free matrix-valued quadratic Matérn (QM) radial basis function (RBF) for the shape function and divergence-free matrix-valued compactly supported Gaussian (CSG) RBF for the weight function on the computational domain and its boundary. The continuity equation is inherently built-in in the formulation and the pressure is eliminated from the formulation with the aid of divergence theorem and the choice of divergence-free weight function. The developed method is thus iteration free, and results in a banded system of equations to be solved jointly for both velocity components. Gauss-Legendre cell integration is performed in the current investigation. The characteristics of the method are assessed by changing its free parameters, i.e., weight functions' sub-domain radius and shape functions' support domain

radius and the shape parameter. A sensitivity test for several choices of shape functions with regular centers arrangement is done to identify the appropriate support size for the shape and weight functions and stagnation errors are reported accordingly. To the best of our knowledge, this article is initiative in introducing the application of divergence-free MLPG method to incompressible flows, aiming at elimination of pressure from the governing equations in primitive variables, with the aid of divergence-free RBFs through weak formulation. Only the momentum equation needs to be solved. Hence, the formulation of the problem is much simpler than the building of divergence-free elements in the related mesh-based methods.

Objavljeno v (Published in)

Springer; Engineering with computers; 2022; #Vol. #38, #iss. #6; str. 5359-5377; Impact Factor: 8.700; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 3.300; A': 1; A'': 1; WoS: IU, EV ; Avtorji/Authors: Najafi Mahboubeh, Dehghan Mehdi, Šarler Božidar, Kosec Gregor, Mavrič Boštjan; ISSN: 1435-5663;

COBISS ID
99503875

Leto
2022

Tipologija (Tipology)
1.01 - Izvirni znanstveni članek (Original Scientific Article)

Naslov (Title) SLO

Numerična simulacija mešanja tekočine s ferrofluidom v magnetnem polju z uporabo brez mrežne metode SPH

Naslov (Title) EN

Numerical simulation of mixing fluid with ferrofluid in a magnetic field using the meshless SPH method

Opis (Description) SLO

V tej raziskavi je izvedena numerična analiza vpliva različnih magnetnih polj na procese mešanja ferrofluida in tekočine v dvodimenzionalnem mikrokanalu. Za reševanje enačb ohranitve mase, gibalne količine na osnovi ferohidrodinamike in snovi je uporabljena izboljšana različica hidrodinamike gladkih delcev (SPH), dopolnjena z algoritmom premikanja delcev in robnim pogojem z navideznimi delci. Metoda je formulirana prek nepravilne razporeditve vozlišč, pri čemer so polja aproksimirana z Wendlandovo jedrno funkcijo petega reda. Po validaciji računskega pristopa je bil prvič raziskan vpliv števila vzporednih električnih žic, od ene do treh, nameščenih pravokotno na mikrokanal, na učinkovitost mešanja. Ugotovljeno je, da je učinkovitost mešanja izrazito nelinearno odvisna od Reynoldsovega števila in števila električnih žic. Pri $Re \leq 20$ je učinkovitost mešanja pri dveh in treh električnih žicah skoraj enaka in približno dvakrat večja kot pri eni. Pri $Re \geq 80$ je učinkovitost mešanja pri treh žicah bistveno večja kot pri eni ali dveh. Optimalna zmogljivost mikromešalnika je dosežena s tremi električnimi žicami, saj mešalnik v primerjavi z drugima preučevanima primeroma dobro deluje v širšem območju Reynoldsovega števila. Izsledki te raziskave, pridobljeni z brez mrežno metodo, so pomembni za industrijsko načrtovanje mikromešalnikov.

Opis (Description) EN

In this study, a numerical investigation of the effect of different magnetic fields on ferrofluid-fluid mixing processes in a two-dimensional microchannel is performed. An improved version of smoothed particle hydrodynamics, SPH, by shifting particle algorithm and dummy particle boundary condition, is implemented to solve numerical continuity, ferrohydrodynamics-based momentum and mass transfer equations. SPH is formulated through the irregular arrangement of the nodes where the fields are approximated using the fifth-order Wendland kernel function. After validating the computational approach, the influence of the number (from one to three) of parallel electrical wires positioned perpendicular to the microchannel on the mixing efficiency is studied for the first time. It has originally been found that the mixing efficiency highly non-linearly depends on the Reynolds number and the number of electrical wires. For $Re \leq 20$, the mixing efficiency is almost the same for two and three electrical wires and about two times higher than one electrical wire. For $Re \geq 80$, the mixing efficiency of three wires is much higher than one and two electrical wires. Optimum performance of the micromixer is achieved with three electrical wires, since the mixer performs well on a broader range of Re than the other two studied cases. The outcomes of this study, obtained by a meshless method, are important for the industrial design of micromixers.

Objavljeno v (Published in)

MDPI AG; Fluids; 2022; #Vol. #7, #iss. #11; str. 1-12; Avtorji/Authors: Abdolazadeh Mohsen, Tayebi Ali, Ahmadinejad Mehrdad, Šarler Božidar; ISSN: 2311-5521;

COBISS ID
127806979

Leto
2022

Tipologija (Tipology)
1.01 - Izvirni znanstveni članek (Original Scientific Article)

Naslov (Title) SLO

Simulacija razpok z metodo faznega polja četrtega reda z uporabo brez mrežne metode v močni obliki

Naslov (Title) EN

Fourth-order phase-field simulation of cracks using strong form meshless method

Opis (Description) SLO

Napoved širjenja razpok v mehaniki loma je še vedno temeljni izziv. V zadnjih desetletjih se je formulacija faznega polja izkazala za močno orodje za simulacijo razvoja razpok, saj omogoča kontinuirano predstavitev razpok od nespremenjenega do pretrganega materiala. V tej študiji je prvič kombinirana metoda faznega polja četrtega reda in brez mrežna metoda v močni obliki za raziskovanje širjenja razpok v krhkem elastičnem materialu. Za reševanje povezanih mehanskih in fazno-poljskih modelov je uporabljena lokalna kolokacijska metoda z radialnimi baznimi funkcijami, strukturirana z nadgrajenimi poliharmonskimi zlepci. Zaradi gladke narave modela faznega polja četrtega reda se lahko prepreči ostra prehodna površina razpoke. Ugotovljeno je, da predlagana metoda uspešno napoveduje širjenje razpok pri materialu, izpostavljenem natezni obremenitvi. Pridobljeni rezultati se dobro ujemajo z referenčnim primerom. Nadaljnje raziskave bodo vključevale elasto-plastično obnašanje materiala in uporabo pri nastajanju razpok v različnih korakih obdelave jekla.

Opis (Description) EN

The prediction of crack propagation in fracture mechanics is still a fundamental challenge. In recent decades, phase-field formulation emerged as a powerful tool for the simulation of crack evolution, which offers a continuous representation of cracks from intact to broken material. For the first time, the present study combines a fourth-order phase field and a strong-form meshless method to investigate crack propagation in brittle elastic material. The local radial basis function collocation method, structured with the augmented polyharmonic splines, is used to solve the coupled mechanical and phase-field models. Due to the smooth nature of the fourth-order phase-field model, the sharp transition at the crack surface can be avoided. It is found that the presented method successfully predicts the crack propagation for a material subjected to tensile loading. The obtained results agree well with the benchmark case. Further study will include elastoplastic material behaviour and applications to crack formation in different steel processing steps.

Objavljeno v (Published in)

IOP publishing; Journal of physics; Conference series; 2024; #Vol. #2766, [article no.] 012167; str. 1-6; Avtorji/Authors: Ali Izaz, Vuga Gašper, Mavrič Boštjan, Hanoglu Umut, Šarler Božidar; ISSN: 1742-6596;

COBISS ID
197659395

Leto
2024

Tipologija (Tipology)
1.08 - Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci (Published Scientific Con

Naslov (Title) SLO

Lekcije iz pospeševanja RBF-KR modela faznega polja rasti dendritov na GPU-jih

Naslov (Title) EN

Lessons from accelerating an RBF-FD phase-field model of dendritic growth on GPUs

Opis (Description) SLO

Simulacija rasti dendritov z modelom faznega polja predstavlja najnovejši dosežek na področju modeliranja strjevanja in se običajno izvaja z modeli končnih diferenc, ki so združeni z eksplisitnim časovnim korakom in pospešeni z uporabo GPU-jev. Ti modeli so glavni kandidati za tovrstno pospeševanje, saj zahtevajo številne aritmetične operacije na relativno majhnem številu podatkov. Predstavljamo poskus prenositve obstoječega RBF-KR kode, optimizirane za

izvajanje na CPU-jih, na GPU pospešitev, pri čemer ohranjamo prenosljivost končne implementacije med različnimi arhitekturami. Razpravljamo o doseženi pospešitvi, skaliranju in težavah pri implementaciji ter kritično obravnavamo trenutno stanje ponudbe GPGPU.

Opis (Description) EN

Phase-field modeling of dendritic growth presents the state of the art in the field of solidification modeling and are usually implemented using finite difference models combined with explicit time marching and accelerated by using GPUs. They are a prime candidate for such acceleration, since they require many arithmetic operations on relatively low amount of data. We present an attempt at porting an existing RBF-FD code optimized for CPU execution to use GPU acceleration while keeping the resulting implementation portable between architectures. We discuss the acceleration achieved, scaling and implementation issues and critically discuss current landscape of GPGPU offerings.

Objavljeno v (Published in)

IOP publishing; Journal of physics; Conference series; 2024; #Vol. #2766, [article no.] 012168; str. 1-6; Avtorji/Authors: Mavrič Boštjan, Dobravec Tadej, Šarler Božidar; ISSN: 1742-6596;

COBISS ID

208869891

Leto

2024

Tipologija (Tipology)

1.08 - Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci (Published Scientific Con

Naslov (Title) SLO

Numerično modeliranje kontinuirnega litja okroglih gredic s turbulenco v talini

Naslov (Title) EN

Numerical modelling of continuous casting of round billets with turbulence in the melt

Opis (Description) SLO

Cilj tega dela je rešiti primerjalni problem kontinuirnega litja v osni simetriji s turbulenco v talini z brez mrežno metodo. Fizikalni model sistema tekočina-trdna snov, ki vključuje maso, gibalno količino in ohranitev energije, je formuliran v približku kontinuumske mešanice. Predpostavimo, da je talina Newtonova in nestisljiva. Implementiran je k-epsilon Reynolds averaged Navier-Stokes model turbulence z Abe-Kondoh-Nagano zapirali. Kašasto območje je modelirano kot Darcyjev porozni medij z Kozeny-Carman modelom za permeabilnost. Rešitev parcialnih diferencialnih enačb je implementirana lokalno z uporabo kolokacije z radialnimi baznimi funkcijami in eksplicitnim časovnim korakom. Sklopitev hitrosti in tlaka je izvedena z metodo delnega koraka. Validacija modela je ocenjena s primerjavo njegovih rezultatov z rezultati metode končnih volumnov. Prikazana je študija občutljivosti spreminjajoče se hitrosti in temperature litja na polja hitrosti, temperature in trdnega deleža.

Opis (Description) EN

The present work aims to solve the continuous casting benchmark problem in axisymmetry with turbulence in the melt by the meshless method. The physical model of the liquid-solid system that involves mass, momentum and energy conservation is formulated in the mixture continuum approximation. The melt is assumed Newtonian and incompressible. A k-epsilon Reynolds averaged Navier-Stokes turbulence model is implemented with Abe-Kondoh-Nagano closures. The mushy region is modelled as a Darcy porous media with the Kozeny-Carman permeability model. The solution of partial differential equations is implemented locally using collocation with radial basis functions and explicit time-stepping. The velocity pressure coupling is performed using the fractional step method. The validation of the model is assessed by comparing its outcomes with the results of the finite volume method. A sensitivity study of the varying casting speed and temperature on the velocity, temperature, and solid fraction fields is shown.

Objavljeno v (Published in)

IOP publishing; Journal of physics; Conference series; 2024; #Vol. #2766, [article no.] 012200; str. 1-6; Avtorji/Authors: Mramor Katarina, Rek Zlatko, Vertnik Robert, Šarler Božidar; ISSN: 1742-6596;

COBISS ID

Leto

Tipoloaiia (Tipoloav)

Naslov (Title) SLO

Brezmrežna simulacija osnosimetričnega problema Rayleigh-Taylorjeve nestabilnosti z metodo faznega polja

Naslov (Title) EN

Phase-field formulated meshless simulation of Rayleigh-Taylor instability problem

Opis (Description) SLO

Formulacija sistema dveh nemešljivih Newtonovskih tekočin z različnima gostotama pod vplivom gravitacije temelji na pristopu metode faznega polja (PFM). Reševanje pripadajočih sklopljenih vodilnih Navier-Stokesovih (NS) enačb in enačb Cahn-Hilliard (CH) je zasnovano z uporabo brez mrežne difuzne aproksimacijske metode (DAM) in metode PISO za sklopitev tlaka in hitrosti. Spremenljiva gostota je vključena v vse člene. Problem gibajoče se meje je obravnavan enodomensko s fiksno in nepravilno razporeditvijo računskih vozlišč v kartezičnih in osnosimetričnih koordinatah. Brezmrežna metoda DAM uporablja uteženo aproksimacijo najmanjših kvadratov na prekrivajočih se lokalnih podobmočjih, polinomske bazne funkcije drugega reda in Gaussove uteži. Ta postopek reševanja izboljša stabilnost v primerjavi s Chorinovo sklopitvijo tlaka in hitrosti, ki je bila uporabljena za predhodne brez mrežne rešitve sorodnih problemov. Simulacije problema Rayleigh-Taylorjeve nestabilnosti so izvedene pri Atwoodovem številu 0,76. Parametri metode DAM, to sta oblikovni parameter Gaussove utežne funkcije in število vozlišč v lokalnem podobmočju, so enaki kot v predhodnih študijah avtorjev o enofaznih tokovih. V obravnavanem območju simulacij ni potrebna protivetna shema. Rezultati se dobro ujemajo s študijami mrežnih metod končnih volumnov, izvedenimi z odprtokodno kodo Gerris, kodo OpenFOAM® in predhodno obstoječimi rezultati.

Opis (Description) EN

The interface between two immiscible Newtonian liquids with different densities and the same viscosity, influenced by gravity, is based on the Phase-Field Method (PFM) formulation. The solution of the related governing coupled Navier-Stokes (NS) and Cahn-Hilliard (CH) equations is structured by the meshless Diffuse Approximate Method (DAM) and Pressure Implicit with Splitting of Operators (PISO). The variable density is involved in the inertial and buoyancy terms (non-Boussinesq formulation). The related moving boundary problem is handled through single-domain, irregular, fixed node arrangement in two-dimensional Cartesian coordinates. The meshless DAM uses weighted least squares approximation on overlapping subdomains, polynomial shape functions of second-order and Gaussian weights. Implicit time discretisation is performed for the NS and CH equations in the momentum predictor and Phase-Field (PF) variable corrector steps of PISO, while the momentum corrector steps solve the NS equation explicitly. This solution procedure has improved stability compared to Chorin's pressure-velocity coupling, previously used in meshless solutions of related problems. The Rayleigh-Taylor instability problem simulations are performed for an Atwood number of 0.76. The DAM parameters (shape parameter of the Gaussian weight function and number of nodes in a local subdomain) are the same as in the author's previous studies on single-phase flows. The simulations did not need any upwinding in the range of the simulations. The results compare well with the mesh-based finite volume method studies performed with the open-source code Gerris.

Objavljeno v (Published in)

IOP publishing; Journal of physics; Conference series; 2024; #Vol. #2766, [article no.] 012163; str. 1-6; Avtorji/Authors: Rana Khush Bakhat, Mavrič Boštjan, Šarler Božidar; ISSN: 1742-6596;

COBISS ID

197787651

Leto

2024

Tipologija (Tipology)

1.08 - Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci (Published Scientific Con

Naslov (Title) SLO

Brezmrežna simulacija testnega primera makroizcejanja z upoštevanjem gibanja trdne faze

Naslov (Title) EN

Meshless simulation of a macrosegregation benchmark considering the solid motion

Opis (Description) SLO

V tem prispevku je obstoječi dvodimenzionalni testni primer toge trdne faze za binarno snov razširjen z gibanjem trdne faze. Predpostavljen je nestisljiv laminaren Newtonski tok, za prenos mase, gibalne količine, energije in topljenca pa je uporabljena standardna formulacija mešanice. Model gibanja suspendirane trdne faze upošteva prosto gibajoča se zrna, pri čemer se predpostavlja, da je hitrost trdne faze sorazmerna hitrosti mešanice in deležu kapljevite faze. Za opis masnih deležev faz je uporabljeno vzvodno pravilo. Dvodimenzionalni testni primer je rešen z delno implicitno brez mrežno difuzno aproksimacijsko metodo s prilagodljivo protivetrno diskretizacijo. Rezultati brez mrežne metode so primerjani z rezultati metode končnih volumnov, pri čemer je doseženo razumno ujemanje. Novi rezultati testnega primera pokažejo, da ima gibanje trdne faze bistven vpliv na vzorec makroizcejanja.

Opis (Description) EN

We have extended the existing two-dimensional rigid solid phase benchmark for binary substance with the solid phase motion in the present paper. Incompressible laminar Newtonian flow is assumed, and a standard mixture formulation is used for the mass, momentum, energy, and solute transport. A coherency solid motion model accounts for the free-floating grains, assuming that the solid velocity is proportional to the mixture velocity and the liquid fraction. The lever rule is used to describe the mass fractions of the phases. A two-dimensional benchmark is solved using the semi-implicit meshless diffuse approximate method with an adaptive subdomain upwinding strategy. The results of the meshless method are compared to the finite volume method results with a reasonable agreement. The new benchmark results show that the solid motion has an essential effect on the macrosegregation pattern.

Objavljeno v (Published in)

IOP Publishing; IOP conference series; Materials science and engineering; 2023; #Vol. #1281; Str. 1-8; Avtorji/Authors: Govže Viktor, Vušanović Igor, Šarler Božidar; ISSN: 1757-8981;

COBISS ID

153238787

Leto

2023

Tipologija (Typology)

1.08 - Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci (Published Scientific Con

Naslov (Title) SLO

Metoda temeljnih rešitev za dvofazni Stokesov tok

Naslov (Title) EN

Method of fundamental solutions for two-phase Stokes flow

Opis (Description) SLO

Za reševanje enačb dvofaznega Stokesovega toka v 2D geometriji je bila uporabljena metoda temeljnih rešitev s tehniko podobmočij. Metoda je enostavna, računsko učinkovita in zelo natančna. Predstavljen je algoritem, s katerim v iterativnem postopku izračunamo obliko medfazne meje. Uspešnost tega pristopa je prikazana na primeru kapljevinskega curka v vzporednem toku plina. Primerjava oblike medfazne meje oz. debeline curka po predstavljeni formulaciji in referenčno numerično rešitvijo po metodi kontrolnih volumnov pokaže uspešnost metode temeljnih rešitev za obravnavo problemov dvofaznega Stokesovega toka.

Opis (Description) EN

The method of fundamental solutions with the subdomain technique was used to solve the equations of two-phase Stokes flow in 2D geometry. The method is simple, computationally efficient and very accurate. An algorithm is presented to calculate the shape of the interfacial boundary in an iterative procedure. The success of this approach is shown in the case of a liquid jet in a parallel gas flow. Comparison of the shape of the interphase boundary or the thickness of the jet according to the presented formulation and the reference numerical solution by the method of control volumes shows the success of the method of fundamental solutions for dealing with the problems of two-phase Stokes flow.

Objavljeno v (Published in)

Slovensko društvo za mehaniko; 2022; Str. 194-201; Avtorji/Authors: Rek Zlatko, Šarler Božidar;

COBISS ID	Leto	Tipologija (Tipology)
123905283	2022	1.08 - Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci (Published Scientific Con

- Potrjujemo, da so dosežki, navedeni v točki 6, ključni dosežki raziskovalnega projekta, ki so bili v večji meri financirani s sredstvi raziskovalnega projekta (vsaj 50 %) in imajo v objavi navedeno afilicijo raziskovalne organizacije, ki izvaja projekt, številko projekta ter naziv sofinancerja

7. Najpomembnejši dosežki projektne skupine na področju gospodarstva, družbenih in kulturnih dejavnosti

8. Drugi pomembni rezultati projektne skupine (v kolikor gre za mednarodni projekt, prikažite prispevek tujega partnerja)

ŠARLER, Božidar (urednik), VANOLI, Laura (urednik), DOBRAVEC, Tadej (urednik). Eurotherm 2024 : 9th European Thermal Sciences Conference, 10/06/2024 - 13/06/2024, Lake Bled, Slovenia. [S. l.]: IOP publishing, 2024. 1 spletni vir (več datotek PDF (loč. pag.)), ilustr. Journal of physics. Conference series (Online), vol. 2766. ISSN 1742-6596. <https://iopscience.iop.org/issue/1742-6596/2766/1>. [COBISS.SI-ID 197654787]

ŠARLER, Božidar (urednik), VANOLI, Laura (urednik), DOBRAVEC, Tadej (urednik). Eurotherm 2024 : book of abstracts : 9th European Thermal Sciences Conference : 10 - 13 June 2024, Bled, Slovenia. Online version. Ljubljana: Faculty of Mechanical Engineering, 2024. 1 spletni vir (1 datoteka PDF (XXII, 341 str.)), portreti. ISBN 978-961-7187-07-6. https://eurotherm2024.si/images/Book_of_abstracts.pdf, Digitalna knjižnica Slovenije - dLib.si. [COBISS.SI-ID 198029827]
211. Computational thermal sciences.

RANA, Khush Bakhat. Development of meshless numerical method for simulation of compressible two-phase flow : doctoral thesis. Ljubljana: [K. B. Rana], 2025. XXX 149 str., ilustr. Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL. [COBISS.SI-ID 224913923]

BELŠAK, Grega. Numerical simulations of nozzles with gas and liquid focusing for production of micro-jets : dissertation. Nova Gorica: [G. Belšak], 2022. XXXIII, 156 str., ilustr. <http://repozitorij.ung.si/lzpisGradiva.php?id=7777>, Repozitorij Univerze v Novi Gorici - RUNG. [COBISS.SI-ID 132635395]

9. Pomen raziskovalnih rezultatov projektne skupine

9.1. Pomen za razvoj znanosti

SLO

Raziskovalni projekt je sodil v temeljni del spektra raziskav Laboratorija za dinamiko fluidov in termodinamiko Fakultete za strojništvo, UL in Laboratorija za Simulacijo Materialov in Procesov IMT. Raziskave se uvrščajo v moderno raziskovalno področje modeliranja, simulacije in optimizacije procesov in materialov, ki ima čedalje vidnejšo vlogo v mednarodnem raziskovalnem prostoru - zaradi vse večjih potreb po digitalizaciji, cenениh izdelkih z visoko vsebnostjo znanja, novih materialih ter okolju prijaznejših tehnologijah. Vsebina naših raziskav je bila v ta prostor aktivno vpeta z vodilnimi temeljnimi in aplikativnimi komponentami. Pri tem smo si v okviru temeljnih raziskav prizadevali v svetovno zakladnico znanja prispevati z novimi pristopi večfizikalnega modeliranja večfaznih sistemov na več sklopljenih merilih, z naprednimi brez mrežnimi numeričnimi pristopi za modeliranje problemov s premičnimi mejami, z razvojem mednarodnih testnih primerov in referenčnimi izračuni za validacijo in verifikacijo Stefanovih problemov. Med drugim smo demonstrirali prvi razvoj in uporabo brez mrežnih metod za industrijsko relevantne probleme s turbulentnim tokom, stisljivim tokom in dvofaznim tokom, prvo uporabo brez mrežnih metod pri modeliranju mikrostrukture na podlagi točkovnih avtomatov in metode faznega polja. Med drugim smo kot prvi demonstrirali od diskretizacije neodvisne rezultate makroizcejanja, predlagali prvi mednarodni testni primer kontinuirnega ulivanja, itd.

Naše brez mrežne algoritme za hitro časovno sklopljeno spremljanje procesnih parametrov strjevanja pri kontinuirnem ulivanju je najti v več kot 200 jeklarnah po vsem svetu.

Mednarodno izobraževanje, ki izhaja iz pričujočih raziskovalnih vsebin, je v zadnjih letih našlo svoje mesto v sodelovanju z uglednimi mednarodnimi letnimi šolami. Nadalje se raziskave zrcalijo v podiplomskem izobraževanju v Sloveniji. Dva doktorska študenta (dr. Grega Belšak in dr. Rana Khush Bakhat) sta končala doktorske disertacije v okviru tega projekta.

EN

The completed research project has formed a part of the fundamental research spectra conducted at the Laboratory for Fluid Dynamics and Thermodynamics, University of Ljubljana and the Laboratory for Simulation of Materials and Processes, IMT. The research project belonged to the modern research area of modelling, simulation and optimisation of processes and materials, which plays an increasingly important role in international research because of the need for digitalisation, inexpensive products with a large know-how input, new materials and environmentally friendly technologies. Our research contents are actively integrated into this research area by their leading basic and applied components. In the framework of our fundamental research, we seek new approaches in complex multiphysics modelling of multiphase systems at multiple scales, with advanced meshfree methods for moving boundary problems, and with the development of international test cases and reference solutions for validation and verification of Stefan problems. We demonstrate leading research results in all three mentioned areas. We have among others, demonstrated the first development and application of meshless methods to industrially relevant turbulent fluid flow problems, compressible flow, two-phase flow, first application of meshless methods in point automata, and phase-field microstructure modelling. We have, among others, for the first time demonstrated discretisation independent results of macrosegregation, suggested the first international test case for continuous casting of steel, etc. Our meshless algorithms for fast online simulation of solidification in continuous casting of steel found application in more than 200 steel plants all over the World.

International education, which stems from the current research topics, found its place in cooperation with several renowned international summer schools. Further, the research project has acted as a base for graduate education in Slovenia. Two post-graduate students have completed their PhD studies (Dr. Grega Belšak, Dr. Rana Khush Bakhat) within the project.

9.2. Pomen za razvoj Slovenije

SLO

S pridobljenim znanjem smo svoj vpliv v metalurški in farmacevtski industriji ter v velikih raziskovalnih centrih še dodatno razširili. V Sloveniji se samo z izdelavo zlitin ukvarja približno 100 v izvoz naravnanih podjetji, ki nudijo približno deset tisoč delovnih mest. Vsa našeta podjetja izkazujejo močno zanimanje za delo projektne skupine. Zaključene raziskave imajo neposredne povezave in vpliv na mednarodni raziskovalni prostor (EU, ZDA, Azija) preko več mednarodnih projektov, predvsem na podlagi razvoja novih sistemov za dostavo vzorcev v femtosekundni kristalografiji, ki so pomembni pri razvoju novih zdravil. Demonstrirali smo mednarodno znanstveno in pedagoško odličnost in relevantnost zaključenih raziskav za Slovenijo in širše. Vsebina projekta je sovpadala z vsemi tremi raziskovalnimi prioritetami Horizont Europe: odlična znanost, globalni izzivi in evropska industrijska konkurenčnosti, inovativnost Evrope.

Na podlagi v projektu razvitega znanja smo ob koncu leta 2025 podpisali pogodbo o dolgoročnem sodelovanju z enim največjih proizvajalcev metalurške opreme Danieli, Butrio, Italija.

Zaradi mednarodnega ugleda naših raziskav smo od 10. do 13. junija 2024 na Bledu organizirali priznano konferenco Eurotherm, ki je organizirana na vsakih 4 leta s 350 udeleženci iz 35 držav. Prav tako so nam zaupali organizacijo konference Advances in Solidification Processing od 4. do 8. junija 2028 na Bledu.

EN

With the gained knowledge, we have further extended our industrial impact in the metallurgical and pharmaceutical industries and large international research centres. Slovenia has approx. 100 export-oriented companies only for alloy manufacturing with 10,000 jobs. The project team has a big end-user pull from these companies. The completed research has a direct link and influence on international research areas (Europe, USA, Asia) through several international projects, mainly based on the development of new sample delivery systems in femtosecond crystallography, which are important in the development of new drugs. This demonstrates the international scientific and educational excellence and relevance of the completed research for Slovenia and beyond. The project's contents

have aligned with all three Horizon Europe research priorities: Excellent Science, Global Challenges and European Industrial Competitiveness, and Innovative Europe.

Based on the knowledge gained in this project, we have at the end of 2025, signed a contract on long-term collaboration with one of the largest producers of steel processing equipment Danieli, Butrio, Italy.

Due to the international reputation of our research, we organised the prestigious Eurotherm conference in Bled from June 10 to 13, 2024, which is held every 4 years with 350 participants from 35 countries. We were also entrusted with the organisation of the Advances in Solidification Processing conference from June 4 to 8, 2028 at Bled.

10. Označite, katerega od navedenih ciljev ste si zastavili pri projektu, katere konkretne rezultate ste dosegli in v kakšni meri so doseženi rezultati uporabljeni

Cilj	
F.01	Pridobitev novih praktičnih znanj, informacij in veščin
Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
Rezultat	Dosežen
Uporaba rezultatov	Delno
F.02	Pridobitev novih znanstvenih spoznanj
Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
Rezultat	Dosežen
Uporaba rezultatov	Delno
F.03	Večja usposobljenost raziskovalno-razvojnega osebja
Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
Rezultat	Dosežen
Uporaba rezultatov	V celoti
F.04	Dvig tehnološke ravni

Cilj

Zastavljen cilj DA NE

Rezultat

Dosežen

Uporaba rezultatov

V celoti

F.05 Sposobnost za začetek novega tehnološkega razvojaZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Dosežen

Uporaba rezultatov

Uporabljen bo v naslednjih 3 letih

F.06 Razvoj novega izdelkaZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Uporaba rezultatov

F.07 Izboljšanje obstoječega izdelkaZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Uporaba rezultatov

F.08 Razvoj in izdelava prototipaZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Cilj

Uporaba rezultatov

F.09 Razvoj novega tehnološkega procesa oz. tehnologijeZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Dosežen

Uporaba rezultatov

Uporabljen bo v naslednjih 3 letih

F.10 Izboljšanje obstoječega tehnološkega procesa oz. tehnologijeZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Uporaba rezultatov

F.11 Razvoj nove storitveZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Uporaba rezultatov

F.12 Izboljšanje obstoječe storitveZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Uporaba rezultatov

F.13 Razvoj novih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov

Cilj

Zastavljen cilj DA NE

Rezultat

Dosežen

Uporaba rezultatov

V celoti

F.14 Izboljšanje obstoječih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesovZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Uporaba rezultatov

F.15 Razvoj novega informacijskega sistema/podatkovnih bazZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Uporaba rezultatov

F.16 Izboljšanje obstoječega informacijskega sistema/podatkovnih bazZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Uporaba rezultatov

F.17 Prenos obstoječih tehnologij, znanj, metod in postopkov v praksoZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Dosežen

Cilj	
Uporaba rezultatov	V celoti
F.18	Posredovanje novih znanj neposrednim uporabnikom (seminarji, forumi, konference)
Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
Rezultat	Dosežen
Uporaba rezultatov	V celoti
F.19	Znanje, ki vodi k ustanovitvi novega podjetja ("spin off")
Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
Rezultat	Dosežen
Uporaba rezultatov	Uporabljen bo v naslednjih 3 letih
F.20	Ustanovitev novega podjetja ("spin off")
Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
Rezultat	
Uporaba rezultatov	
F.21	Razvoj novih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov
Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
Rezultat	
Uporaba rezultatov	
F.22	Izboljšanje obstoječih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov

Cilj

Zastavljen cilj DA NE

Rezultat

Uporaba rezultatov

F.23 Razvoj novih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitevZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Uporaba rezultatov

F.24 Izboljšanje obstoječih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitevZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Uporaba rezultatov

F.25 Razvoj novih organizacijskih in upravljavskih rešitevZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Uporaba rezultatov

F.26 Izboljšanje obstoječih organizacijskih in upravljavskih rešitevZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Cilj

Uporaba rezultatov

F.27 Prispevek k ohranjanju/varovanje naravne in kulturne dediščineZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Uporaba rezultatov

F.28 Priprava/organizacija razstaveZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Uporaba rezultatov

F.29 Prispevek k razvoju nacionalne kulturne identiteteZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Dosežen

Uporaba rezultatov

V celoti

F.30 Strokovna ocena stanjaZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Uporaba rezultatov

F.31 Razvoj standardov

Cilj

Zastavljen cilj DA NE

Rezultat

Uporaba rezultatov

F.32 Mednarodni patentZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Uporaba rezultatov

F.33 Patent v SlovenijiZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Uporaba rezultatov

F.34 Svetovalna dejavnostZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Uporaba rezultatov

F.35 DrugoZastavljen cilj DA NE

Rezultat

Cilj

Uporaba rezultatov

Komentar**11. Označite potencialne vplive oziroma učinke vaših rezultatov na navedena področja**

Vpliv					
G.01.	Razvoj visokošolskega izobraževanja				
G.01.01.	Razvoj dodiplomskega izobraževanja	<input type="radio"/> Ni vpliva	<input type="radio"/> Majhen vpliv	<input checked="" type="radio"/> Srednji vpliv	<input type="radio"/> Velik vpliv
G.01.02.	Razvoj podiplomskega izobraževanja	<input type="radio"/> Ni vpliva	<input type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input checked="" type="radio"/> Velik vpliv
G.01.03.	Drugo <input type="text"/>	<input type="radio"/> Ni vpliva	<input type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input type="radio"/> Velik vpliv
G.02.	Gospodarski razvoj				
G.02.01	Razširitev ponudbe novih izdelkov/storitev na trgu	<input type="radio"/> Ni vpliva	<input checked="" type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input type="radio"/> Velik vpliv
G.02.02.	Širitev obstoječih trgov	<input type="radio"/> Ni vpliva	<input checked="" type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input type="radio"/> Velik vpliv
G.02.03.	Znižanje stroškov proizvodnje	<input type="radio"/> Ni vpliva	<input checked="" type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input type="radio"/> Velik vpliv
G.02.04.	Zmanjšanje porabe materialov in energije	<input type="radio"/> Ni vpliva	<input checked="" type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input type="radio"/> Velik vpliv
G.02.05.	Razširitev področja dejavnosti	<input type="radio"/> Ni vpliva	<input type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input checked="" type="radio"/> Velik vpliv
G.02.06.	Večja konkurenčna sposobnost	<input type="radio"/> Ni vpliva	<input type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input checked="" type="radio"/> Velik vpliv
G.02.07.	Večji delež izvoza	<input type="radio"/> Ni vpliva	<input type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input checked="" type="radio"/> Velik vpliv
G.02.08.	Povečanje dobička	<input checked="" type="radio"/> Ni vpliva	<input type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input type="radio"/> Velik vpliv
G.02.09.	Nova delovna mesta	<input type="radio"/> Ni vpliva	<input type="radio"/> Majhen vpliv	<input checked="" type="radio"/> Srednji vpliv	<input type="radio"/> Velik vpliv

Vpliv					
G.02.10.	Dvig izobrazbene strukture zaposlenih	<input type="radio"/> Ni vpliva	<input type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input checked="" type="radio"/> Velik vpliv
G.02.11.	Nov investicijski zagon	<input checked="" type="radio"/> Ni vpliva	<input type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input type="radio"/> Velik vpliv
G.02.12.	<input type="text" value="Drugo"/>	<input type="radio"/> Ni vpliva	<input type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input type="radio"/> Velik vpliv
G.03.	Tehnološki razvoj				
G.03.01.	Tehnološka razširitev/posodobitev dejavnosti	<input type="radio"/> Ni vpliva	<input type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input checked="" type="radio"/> Velik vpliv
G.03.02.	Tehnološko prestrukturiranje dejavnosti	<input checked="" type="radio"/> Ni vpliva	<input type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input type="radio"/> Velik vpliv
G.03.03.	Uvajanje novih tehnologij	<input type="radio"/> Ni vpliva	<input type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input checked="" type="radio"/> Velik vpliv
G.03.04.	<input type="text" value="Drugo"/>	<input type="radio"/> Ni vpliva	<input type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input type="radio"/> Velik vpliv
G.04.	Družbeni razvoj				
G.04.01	Dvig kvalitete življenja	<input type="radio"/> Ni vpliva	<input checked="" type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input type="radio"/> Velik vpliv
G.04.02.	Izboljšanje vodenja in upravljanja	<input type="radio"/> Ni vpliva	<input checked="" type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input type="radio"/> Velik vpliv
G.04.03.	Izboljšanje delovanja administracije in javne uprave	<input checked="" type="radio"/> Ni vpliva	<input type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input type="radio"/> Velik vpliv
G.04.04.	Razvoj socialnih dejavnosti	<input checked="" type="radio"/> Ni vpliva	<input type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input type="radio"/> Velik vpliv
G.04.05.	Razvoj civilne družbe	<input checked="" type="radio"/> Ni vpliva	<input type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input type="radio"/> Velik vpliv
G.04.06.	<input type="text" value="Drugo"/>	<input type="radio"/> Ni vpliva	<input type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input type="radio"/> Velik vpliv
G.05.	Ohranjanje in razvoj nacionalne naravne in kulturne dediščine in identitete	<input type="radio"/> Ni vpliva	<input type="radio"/> Majhen vpliv	<input type="radio"/> Srednji vpliv	<input checked="" type="radio"/> Velik vpliv
G.06.	Varovanje okolja in trajnostni razvoj	<input type="radio"/> Ni vpliva	<input type="radio"/> Majhen vpliv	<input checked="" type="radio"/> Srednji vpliv	<input type="radio"/> Velik vpliv
G.07.	Razvoj družbene infrastrukture				

Vpliv									
G.07.01.	Informacijsko-komunikacijska infrastruktura	<input checked="" type="radio"/>	Ni vpliva	<input type="radio"/>	Majhen vpliv	<input type="radio"/>	Srednji vpliv	<input type="radio"/>	Velik vpliv
G.07.02.	Prometna infrastruktura	<input checked="" type="radio"/>	Ni vpliva	<input type="radio"/>	Majhen vpliv	<input type="radio"/>	Srednji vpliv	<input type="radio"/>	Velik vpliv
G.07.03.	Energetska infrastruktura	<input checked="" type="radio"/>	Ni vpliva	<input type="radio"/>	Majhen vpliv	<input type="radio"/>	Srednji vpliv	<input type="radio"/>	Velik vpliv
G.07.04.	<input type="text" value="Drugo"/>	<input type="radio"/>	Ni vpliva	<input type="radio"/>	Majhen vpliv	<input type="radio"/>	Srednji vpliv	<input type="radio"/>	Velik vpliv
G.08.	Varovanje zdravja in razvoj zdravstvenega varstva	<input checked="" type="radio"/>	Ni vpliva	<input type="radio"/>	Majhen vpliv	<input type="radio"/>	Srednji vpliv	<input type="radio"/>	Velik vpliv
G.09.	<input type="text" value="Drugo"/>	<input type="radio"/>	Ni vpliva	<input type="radio"/>	Majhen vpliv	<input type="radio"/>	Srednji vpliv	<input type="radio"/>	Velik vpliv

Komentar**12. Pomen raziskovanja za sofinancerje****13. Samoevalvacijska ocena učinkov odprtodostopnih recenziranih znanstvenih objav, ki se nanašajo na raziskovalne rezultate****14. Naslov spletne strani za projekte, odobrene na podlagi javnega razpisa za (so)financiranje raziskovalnih projektov ali projekte, ki so sofinancirani po mednarodnih razpisih****15. Kazalniki za merjenje učinkovitosti projekta****15.1. Število znanstvenih objav v okviru projekta****15.2. Število gospodarskih družb, ki v okviru projekta sodelujejo z raziskovalnimi organizacijami (upoštevajte tudi izvajalce in (so)financerje v primeru aplikativnega**

projekta)

5

15.3. Višina izplačanih sredstev gospodarskih družb za (so)financiranje raziskovalno-razvojne dejavnosti (v primeru aplikativnega projekta, kjer kot (so)financer sodeluje gospodarska družba)

EUR

15.4. Število patentov razvitih v okviru projekta

0

15.5. Število skupnih znanstvenih objav, kjer so soavtorji tuji raziskovalci

5

15.6. Število tujih držav, s katerimi je v okviru projekta prišlo do sodelovanja

8

C. Izjave

Podpisani izjavljam/o, da:

- so vsi podatki, ki jih navajamo v poročilu, resnični in točni
- se strinjamo z obdelavo podatkov v skladu z zakonodajo o varstvu osebnih podatkov za potrebe ocenjevanja ter obdelavo teh podatkov za evidence ARIS
- so z vsebino zaključnega poročila seznanjeni in se strinjajo vsi soizvajalci projekta

Potrjujemo zgoraj navedene izjave.

Podpisa (27. 03. 2026 09:44:56):

Zastopnik oz. pooblaščenca oseba

in

Vodja programa/projekta

Jernej Klemenc Digitalno podpisano

Božidar Šarler Digitalno podpisano

Datum: 26. 03. 2026

Oznaka obrazca: 2dyv-npx9-f5gs-u239-uvk9-zhfk-d