

Наслов: Развој софтвера за решавање спрегнутих мултифизичких проблема

Евиденциони број: ТР - 32036

Руководилац: Др Мирослав Живковић, ред. проф., Факултет инжењерских наука, Универзитета у Крагујевцу

---

Факултет инжењерских наука, Универзитета у Крагујевцу  
Сестре Јањић 6  
34000 Крагујевац  
тел: +381 34 300790  
факс: +381 34 300786  
моб: +381 69 8288777

НИО координатор: 200107 Факултет инжењерских наука, Универзитета у Крагујевцу

НИО учесници: 200155 Факултет техничких наука у Косовској Митровици

Организације корисници-партиципанти:

1. ИЦ Инжењеринг д.о.о.
2. Институт за водопривреду „Јарослав Черни“
3. Милановић Инжењеринг д.о.о.
4. ГОША Фабрика шинских возила д.о.о.

Број месеци истраживача: 186

Трајање пројекта: 2011-2017

## **Обавезе дефинисане Уговором о реализацији пројекта за 2016. годину (у даљем тексту: Уговор)**

### **1. Кратак приказ предмета, садржаја и циљева истраживања (Прилог.1 Уговора)**

Циљ пројекта је да се развије домаћи комерцијални софтвер PAK-Multiphysics за решавање спрегнутих мултифизичких проблема на нивоу светски познатих софтвера као што су ABAQUS, ADINA, ANSYS, NASTRAN и др. Развијен софтвер ће бити присутан на домаћем и иностраном тржишту софтвера и моћи ће успешно да се примењује у решавању практичних проблема у индустрији, као и у даљем истраживачком раду и у настави на техничким факултетима у земљи и иностранству. Развијени софтвер ће имати упуство за коришћење и велики број детаљно урађених верификационих примера који покривају све типове коначних елемената и све врсте анализа.

Мултифизички проблеми се могу дефинисати као блиска интеракција у континууму између више физичких поља која припадају различитим научним дисциплинама. Примена софтвера за решавање мултифизичких проблема постала је неопходна у више грана индустрије укључујући аутомобилску, грађевинску, авионску, електронску, телекомуникациону, фармацеутску, биомедицинску итд. Због ограничења које имају поједини програмски модули у решавању сложених спрегнутих проблема, последњих година се појавила потреба за наглим развојем верзија софтвера за мултифизичке проблеме. У складу са савременим светским трендовима и потребама наших корисника у индустрији и на универзитетима у земљи и иностранству, планиран је развој верзије софтверског система за решавање спрегнутих мултифизичких проблема, који ће се звати PAK-Multiphysics. Комплетна истраживања и предвиђене активности пројекта реализоваће се у периоду трајања пројекта у оквиру 7 фаза, од чега је у претходној години била предвиђена реализација 5 фаза кроз укупно 23 активности.

**2. РЕИНЖЕЊЕРИНГ И РАЗВОЈ СОФТВЕРА У ОБЛАСТИ РАЧУНСКЕ МЕХАНИКЕ СОЛИДА.** Предвиђено је прилагођавање софтверског модула за рачунску механику чврстих тела за повезивање са другим софтверским модулима, као и на додатном развоју овог модула. Предвиђен је развој материјалних модела за паметне материјале (SM - Smart Materials) као што су легуре (SMA - Shape Memory Alloys) и полимери (SMP - Shape Memory Polymers) чије се понашање може мењати и контролисати у зависности од температуре, напона и других величина. Због таквих особина ови материјали дају две врсте макро феномена: псеудоеластичност и ефекат памћења облика (SME - Shape Memory Effect). У области геомеханике извршиће се доградња порних притисака у постојеће материјалне моделе (Cam-Clay, Drucker-Prager, Нок-Броун и др.) и њихово прилагођавање за спрезање са модулом за прорачун струјања кроз порозне средине (засићене и незасићене). У оквиру механике лома наставиће се развој и примена проширене методе коначних елемената XFEM у хидро-механичким интеракцијама.

**3. РЕИНЖЕЊЕРИНГ И РАЗВОЈ СОФТВЕРА У ОБЛАСТИ РАЧУНСКЕ МЕХАНИКЕ ФЛУИДА.** Предвиђено је прилагођавање софтверског модула за рачунску механику флуида за повезивање са другим софтверским модулима, као и додатни развој овог модула. Планиран је развој експлицитне верзије кода и његово спрезање са експлицитном верзијом модула за механику чврстог тела.

**5. СПРЕЗАЊЕ И ПАРАЛЕЛИЗАЦИЈА ПОЈЕДИНИХ СОФТВЕРСКИХ МОДУЛА.** У току реализације пројекта, предвиђено је спрезање и паралелизација развијених претходно наведених софтверских модула.

**6. ИНДУСТИЈСКА ПРИМЕНА.** У свим фазама развоја, софтвер PAK-Multiphysics биће тестиран и верификован на многим тест примерима који се могу наћи у литератури, као и у корисничким упуствима са примерима које имају сви познати светски софтвери из ове области. У току реализације пројекта, развијени модули софтвера PAK-Multiphysics преваходно ће се примењивати за потребе свих партиципаната пројекта, као и других потенцијалних корисника у земљи и у свету. Предвиђена је примена развијених спрегнутих софтверских модула и њихова верификација на решавању 5 реалних мултифизичких проблема за потребе партиципаната пројекта.

7. МЕНАЦМЕНТ ПРОЈЕКТА. У току целокупне реализације пројекта и развоја софтвера PAK-Multiphysic, предвиђена је и фаза која ће обухватати активности везане за технички и административни менаџмент пројекта, дисиминацију резултата и одрживост.

Планиран је завршетак три докторске дисертације, као и почетак израде нових докторских дисертација што је од изузетног значаја за развој науке у Србији. Предвиђено је публикавање радова у водећим светским часописима, а многи други резултати пројекта биће сопштени на више међународних скупова.

## **2. Циљ истраживања (Прилог.1 Уговора)**

Циљ истраживања је да се развије софтверски систем PAK-Multiphysics за решавање спрегнутих мултифизичких проблема, развијен до нивоа водећих светских софтвера у овој области. Да би се то остварило неопходно је да се реализују следеће активности: развој софтверских концепата за спрезање софтверских модула директног приступа; реинжењеринг и развој софтвера у области рачунске механике солида; реинжењеринг и развој софтвера у области рачунске механике флуида; спрезање и паралелизација појединих софтверских модула, спрезање струјања флуида-пренос масе; индустријска примена развијеног софтвера у решавању практичних проблема партиципаната.

## **3. Фазе и активности истраживања (Прилог.1 Уговора)**

Фаза 2: Реинжењеринг и развој софтвера у области рачунске механике солида

Активност 1: Развој материјалног модела бетона са оштећењем

Активност 2: Развој и имплементација тетраедарског коначног елемента са међучворовима

Активност 3: Унапређење материјалног модела бетона са оштећењем

Активност 4: Развој и имплементација методологије за статичку и динамичку анализу композитних плоча са функционално градијентном (ФГ) променом материјалних карактеристика

Фаза 3: Реинжењеринг и развој софтвера у области рачунске механике флуида

Активност 5: Развој и имплементација 1Д и 2Д коначних елемената за потребе филтрационе анализе

Активност 6: Развој и имплементација модула за турбулентно струјање флуида

Фаза 5: Спрезање и паралелизација појединих софтверских модула

Активност 7: Развој солвера за извршавање прорачуна на већем броју процесора

Активност 8: Развој и имплементација термо-механичког модела за нелинеарну статичку и динамичку анализу функционално градијентних плоча

Активност 9: Адаптација експлицитне верзије софтвера PAK-Multiphysics и повезивање са експлицитним МСМ-СПХ солвером

Фаза 6: Индустријска примена

Активност 10: Примена развијеног софтвера у анализи различитих типова регалних складишта

Активност 11: Примена развијеног SPH материјалног модела при анализи конструкција за транспорт грануларних материјала

Активност 12: Анализа стабилности бране хидроелектране Ђердап 1

Активност 13: Израда корисничке апликације за задавање оптерећења, граничних услова

Активност 14: Израда корисничке документације, са упутством за употребу развијеног програма PAK-Multiphysics, са верификационим примерима

Активност 15: Испитивање заморних карактеристика материјала при процени интегритета конструкција изложених цикличном оптерећењу

Активност 16: Анализа стабилности бране ХЕ Ђердап 1 применом унапређеног модела бетона

Активност 17: Модификација и унапређење корисничке апликације за задавање оптерећења, граничних услова и спровођење анализе стабилности бране ХЕ Ђердап 1

Активност 18: Анализа филтрационе и напонско-деформационе стабилности насуте бране Власина

Активност 19: Израда корисничке документације, са теоријским основама, упутством за употребу, и верификационим примерима програма PAK-Multiphysics

Активност 20: Развој методологије за експериментално одређивање параметара Johnson-Cook материјалног модела

Фаза 7: Менаџмент пројекта

Активност 21: Технички и административни менаџмент

Активност 22: Промоција резултата пројекта

Активност 23: WEB сервис

### Реализација обавеза дефинисане Уговором

У шестој години истраживања реализоване су све обавезе дефинисане Уговором, дате у поглављу 1. Настављен је рад на реинжењерингу и развоју софтвера у области рачунске механике солида и рачунске механике флуида. Сви развијени програмски модули и софтверски систем верификовани су и поређени са резултатима експеримената, публикованим резултатима и резултатима других водећих софтвера у свету из ове области, као што су ABAQUS, ADINA, ANSYS, COMSOL, NASTRAN и други. Комплетан развој софтвера је праћен пропратном документацијом са свим потребним упутствима на енглеском и српском језику. Развијени и спрегнути PAK модули се успешно примењују за решавање реалних проблема у индустрији, као и за едукацију и истраживање. Корисницима софтвера се пружа потпуна подршка у обуци, одржавању и прилагођавању софтвера специјализованим захтевима.

У Табели 2.1 наведени су предвиђени и остварени резултати на пројекту у периоду за који се подноси извештај. Очигледно је да је знатно већи број резултата остварен него што је планиран. Тренутно је на пројекту ангажовано тринаест студента докторских студија, чије су докторске дисертације директно везане за реализацију пројекта. У току шесте године истраживања три докторанта су успешно одбранила своје докторске дисертације, док је четворици одобрена израда докторске дисертације.

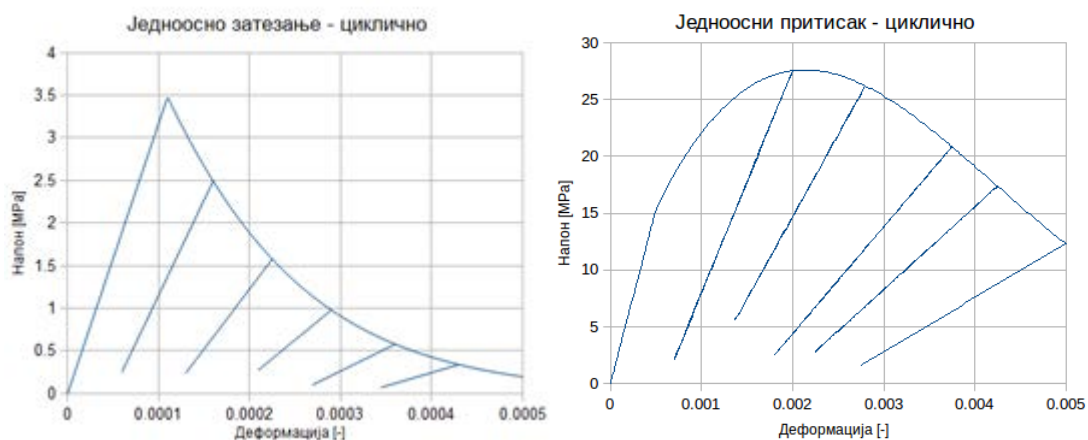
Табела 2.1. Предвиђени и остварени резултати у шестој години истраживања

Шифра	Врста резултата	Предвиђено	Остварено
M21	Рад у врхунском међународном часопису		2
M22	Рад у истакнутом међународном часопису		8
M23	Рад у међународном часопису	3	7
M24	Рад у часопису међународног значаја верификованог посебном одлуком		17
M33	Саопштење са међународног скупа штампано у целини	11	25
M51	Рад у водећем часопису националног значаја		3
M52	Рад у часопису националног значаја		3
M63	Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини	1	3
M71	Одбрањена докторска дисертација		3
M85	Прототип, нова метода, софтвер, стандардизован или атестиран инструмент, нова генска проба, микроорганизми (уз доказ)	1	
	Укупно	16	71

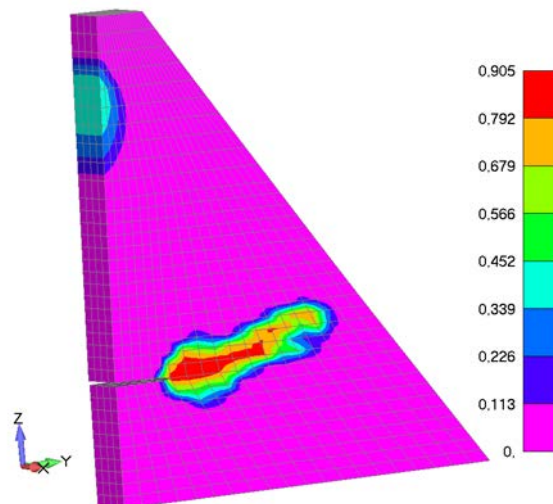
1. Конкретан опис резултата пројекта, по активностима и фазама, који су остварени у извештајном периоду (до 15 страница), са упоређењем са обавезама и резултатима дефинисаним Уговором.

## Фаза 2: Реинжењеринг и развој софтвера у области рачунске механике солида

У оквиру фазе 2 је развијен и имплементиран материјални модел бетона са оштећењем. Извршена је анализа могућих приступа и материјалних модела. Постоје три могућа приступа моделирања понашања бетона: дискретне прсине, размазане прсине, размазане прсине засноване на пластичности са оштећењем. Код модела заснованих на пластичности, круто тело је такође континуум, али се раст прсине посматра као гранични случај пластичног течења. Предност оваквог моделирања је његова заснованост на механици континуума и теорији пластичности. Један од најбољих је еласто-пластични модел са пластичним оштећењем јер поред нееластичних деформација узима у обзир и деградацију крутости (Слике 1 и 2). Поред других модела, Lubliner је добро дефинисао параметар оштећења и омогућио лаку калибрацију параметара на основу експерименталних резултата. Функционалност имплементираног модела је верфикована кроз 1Д, 2Д и 3Д примере на различите врсте оптерећења (притисак, затезање, циклично оптерећење).

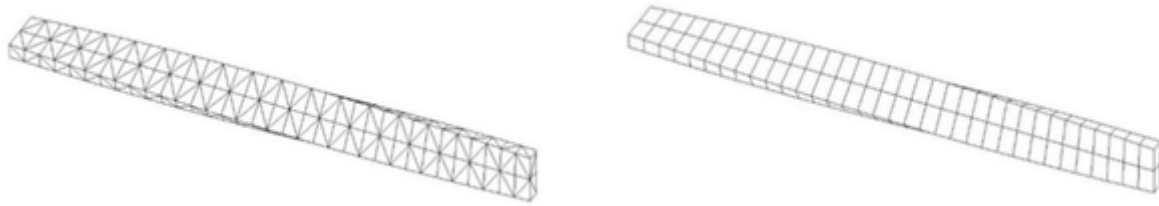


Слика 1. Резултати за циклично оптерећење добијени симулацијом у ПАК-у

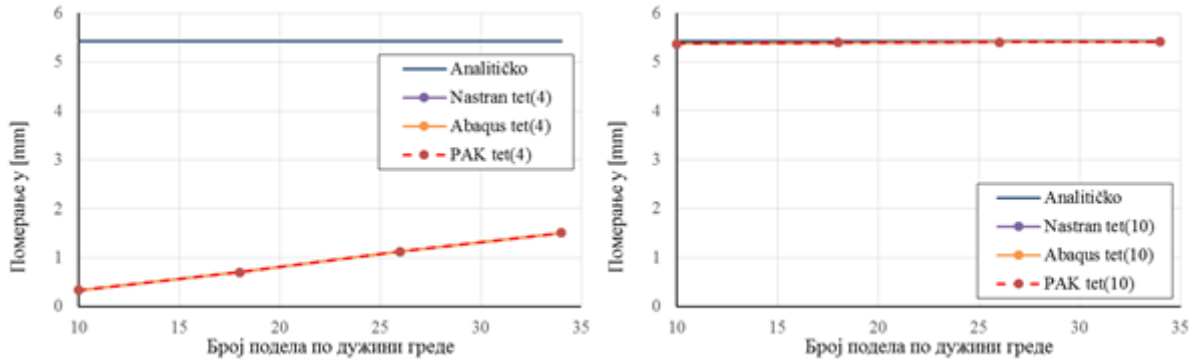


Слика 2. Поље деградације крутости за задато хоризонтално померање врха бране (крајњи положај)

У оквиру фазе 2, активност 2 развијен је и имплементиран тетраедарски коначни елемент са међучворовима, како би се олакшало моделирање сложене и неправилне геометрије при анализи геотехничких конструкција какве су бране са околном стенском масом. Овај коначни елемент је верфикован поређењем резултата са резултатима добијеним применом хексаеарских елемената са и без међучворова, као и поређењем са аналитичким решењима (Слика 3 и 4).

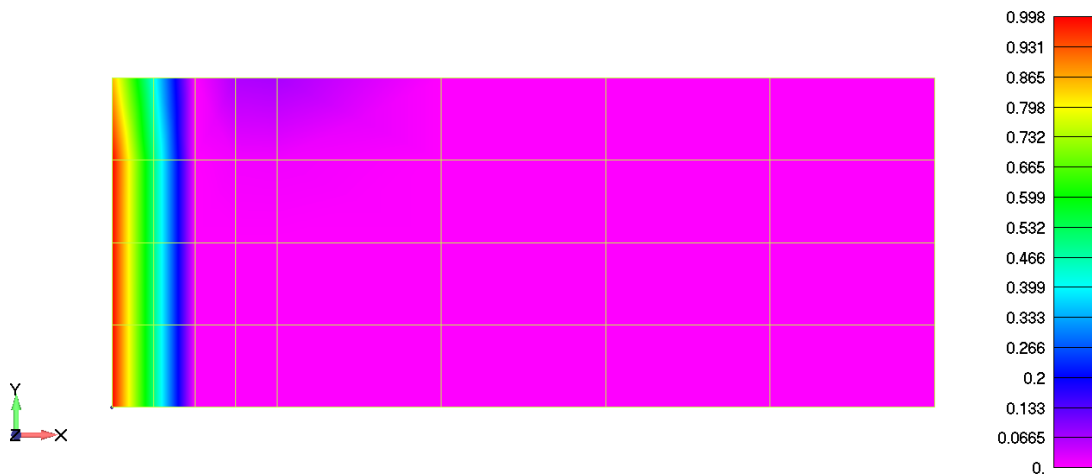


а) б)  
Слика 3. Изглед мреже коришћењем а) тетраедарских и б) хексаедарских елемената



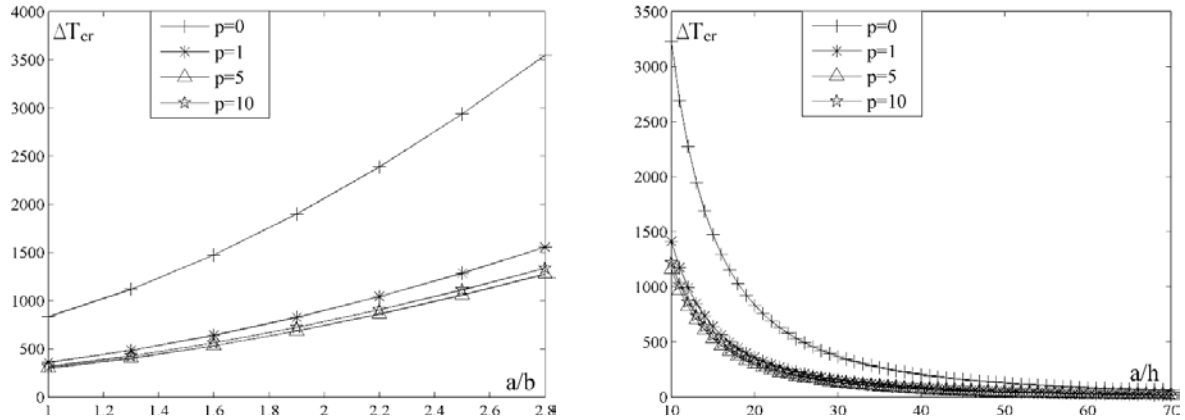
Слика 4. Максимално померање увијене греде без и са међучворовима

У оквиру фазе 2 активност 3 је извршено испитивање могућности примене материјалног модела бетона на стенску масу уз одговарајућа унапређења. Због веома сличног механичког понашања, анализирана је промена функције течења и функције потенцијала што је тестирано на примерима директног смицања. Показало се да је варијацијом параметара који дефинишу облик површи течења, могуће са задовољавајућом тачношћу симулирати понашање стенске масе. Прво је извршена анализа сензитивности параметара који утичу на облик криве, а затим је за параметре који су осетљиви извршена калибрација према доступним експерименталним испитивањима.



Слика 5. Деградација крутости за растеређено стање након померања слободног краја у Y - правцу у супротном смеру

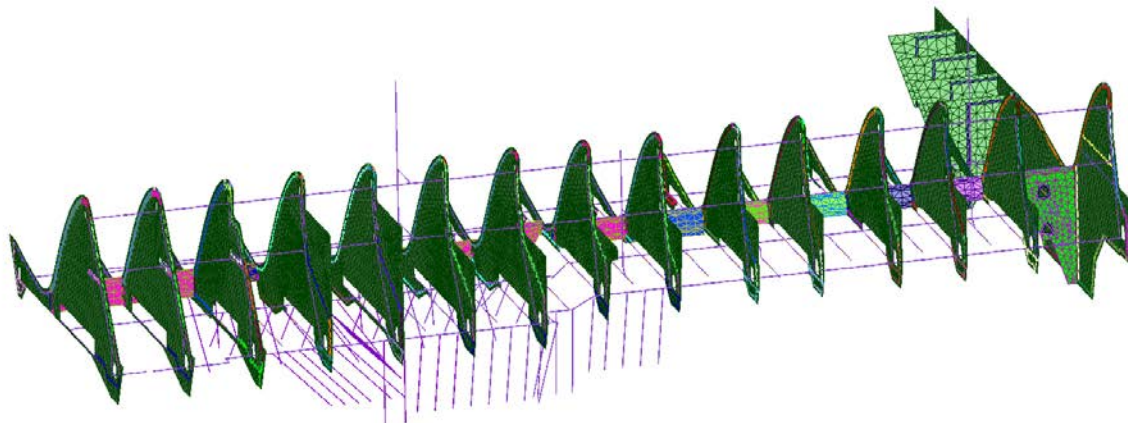
У оквиру фазе 2, активност 4 развијена је нелинеарна термо-механичка статичка и динамичка анализа функционално градијентних (FG) плоча применом смицајних деформационих теорија вишег реда (HSDT) са различитим деформационим функцијама облика (shape function). Примена вон Карманове (von Karman) нелинеарне теорије, укључујући Винклер-Пастернак (Winkler-Pasternak) еластични модел, у анализи извијања плоча изложене термичком оптерећењу - константној промени температуре и промени температуре у функцији координате у правцу дебљине плоче. Обухваћена је и анализа утицаја линеарног и нелинеарног закона промене карактеристика материјала (модула еластичности, коефицијент ширења) у правцу дебљине плоче у зависности од запремисног удела конституената FG материјала.



Слика 6. Утицај односа  $a/b$  и  $a/h$  на критичну температуру извијања при линеарној промени температуре

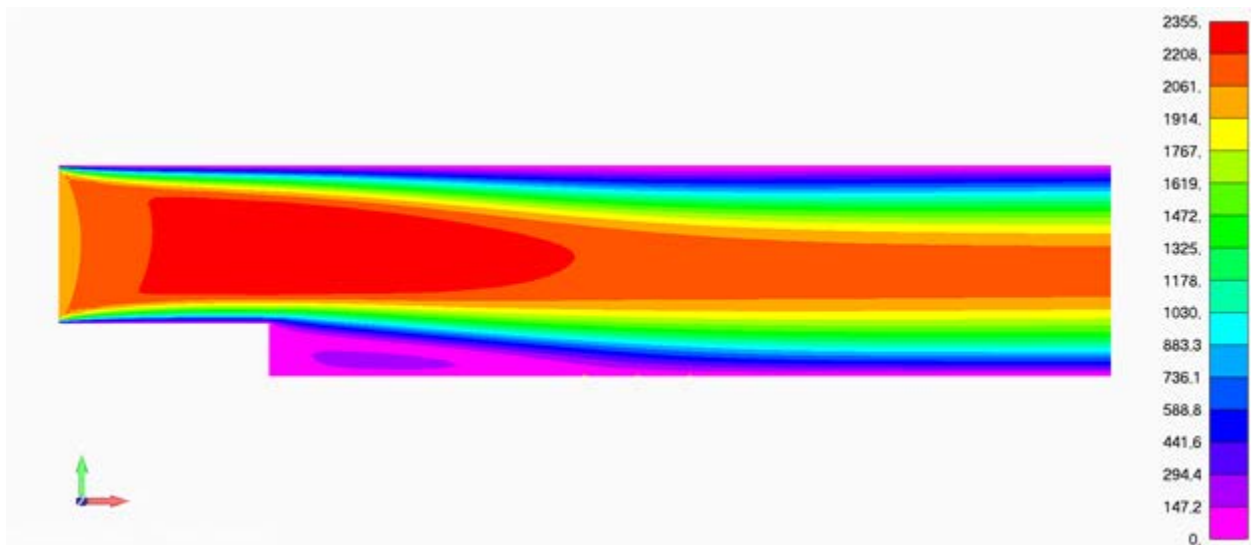
### Фаза 3: Реинжењеринг и развој софтвера у области рачунске механике флуида

У оквиру фазе 3, активност 5 развијени су двочворни и трочворни 1Д елементи као и четвороугаони (четворочворни и осмочворни) и троугаони (трочворни и шесточворни) 2Д елементи за анализу струјања флуида. Тачност уграђених елемената је тестирана на примерима из литературе и поређењем са резултатима добијеним применом комерцијалних софтвера. Након тестирања, ови елементи су коришћени у анализи филтрације на преливног брани ХЕ Ђердап 1.

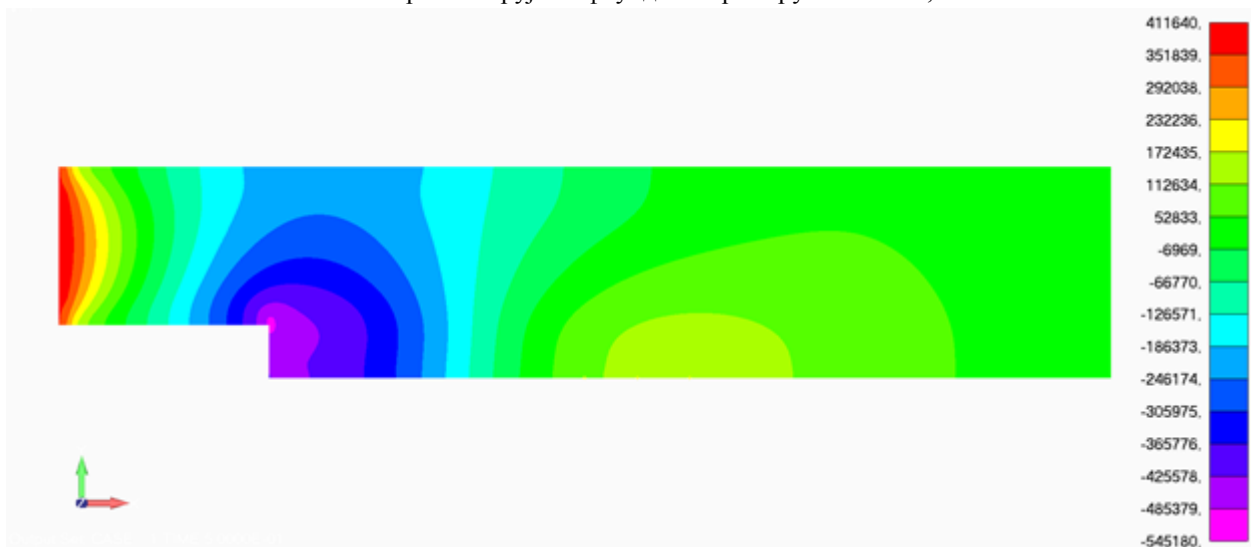


Слика 7. 1Д и 2Д елементи за анализу филтрације

У оквиру фазе 3, активност 6 завршен је развој и имплементација к-омега турбулентног модела у модул за турбулентно струјање флуида. Успешно је извршено спрезање са Рејнолдсовим једначинама. Верификација модела је спроведена на више нумеричких тест примера (Слика 8 и 9). Овде се наводи као пример резултат струјања на примеру степеника. Униформна улазна брзина струјања је 2000, док је Рејнолдсов број 6000. На слици 8 су дати резултати за поље брзине струјања флуида и за поље притиска на слици 9. У поређењу са резултатима из литературе може се закључити да модел даје добре резултате након струјања преко степеника и да такође поље притиска има добре резултате. Модел је верификован и за више вредности Рејнолдсовог броја који иде до 100000.



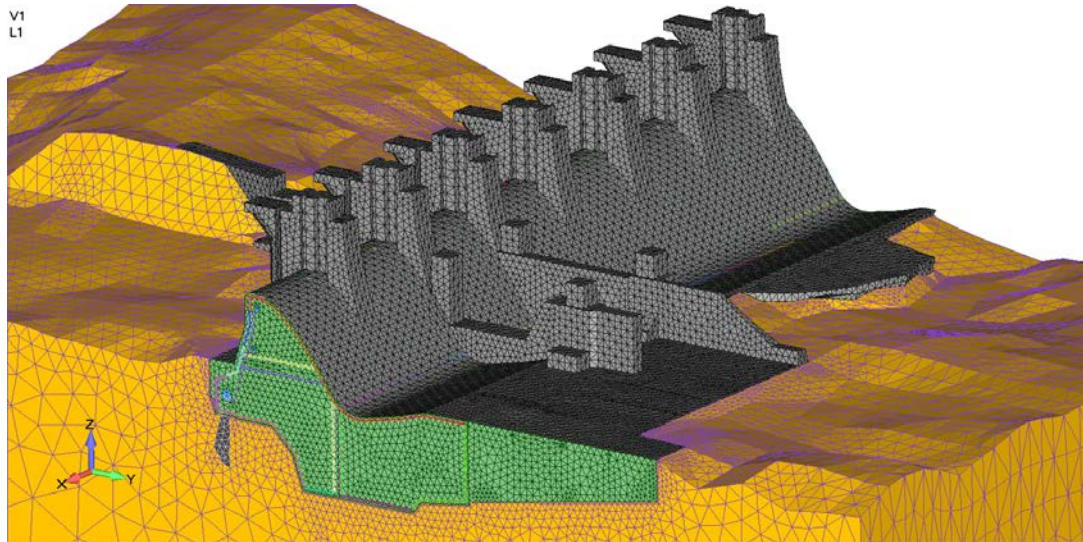
Слика 8. Поље брзине струјања флуида на примеру степеника,  $Re=6000$



Слика 9. Поље притиска флуида на примеру степеника,  $Re=6000$

### Фаза 5: Спрезање и паралелизација појединих софтверских модула

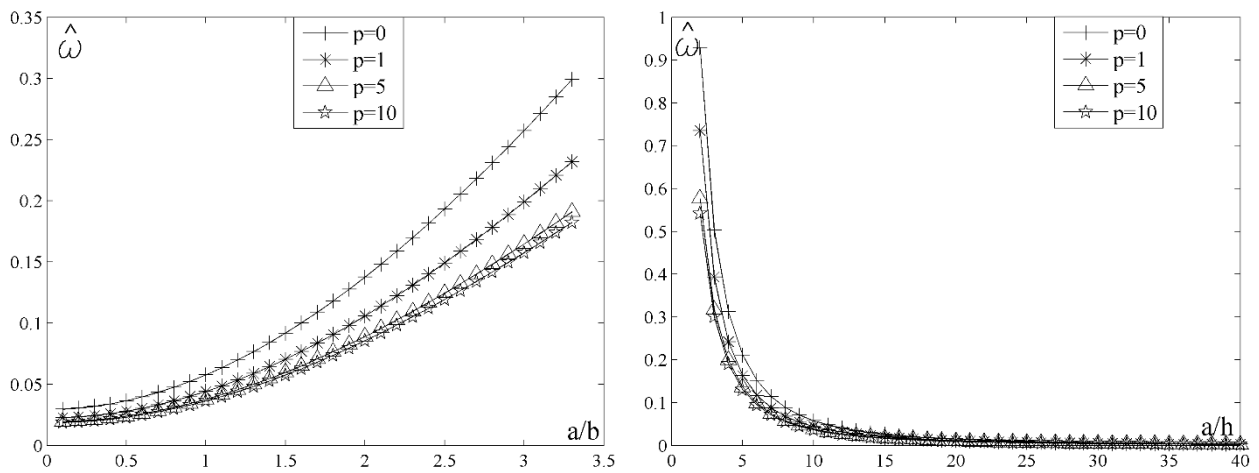
У оквиру фазе 5, активност 7 развијена је метода чувања матрице крутости у тзв. спарс облику, као и паралелни солвер за решавање система линеарних диференцијалних једначина у спарс формату. Развијени спарс солвер може бити коришћен на архитектури са дистрибуираном меморијом, као и на архитектури за дељеном меморијом. Уградњом ове методе чувања матрице крутости, омогућена је нумеричка анализа проблема са великим бројем коначних елемената, какав је проблем анализе бране ХЕ Ђердап 1.



Слика 10. МКЕ модел преливне бране ХЕ Ђердап 1

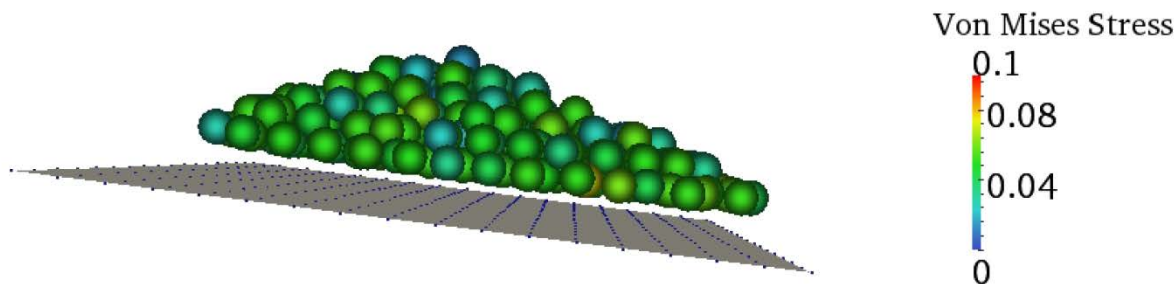
Фаза 5, активност 8 је реализована у оквиру докторске дисертације и представља наставак фазе 2, активности 4.

У оквиру фазе 5, активност 8 развијена је метода за динамичку анализу сопствених вибрација умерено дебелих и дебелих функционално градијентних плоча применом класичне Кирхофове (Kirchhoff) теорије плоча и смицајне деформационе теорије вишег реда (HSDT-Higher-order shear deformation theories) са различитим деформационим функцијама облика (shape function). Имплементирање теорије која узима у обзир промену карактеристике материјала у правцу дебелине плоче у зависности од процентног удела метал/керамика конституената FG материјала.

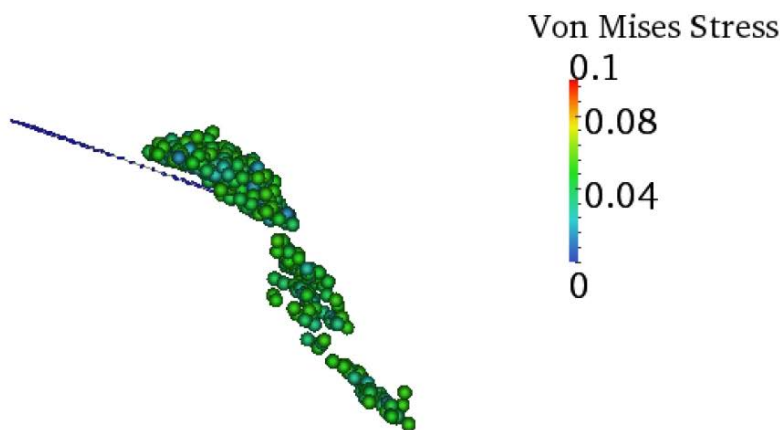


Слика 11. Нормализоване вредности сопствених фреквенција  $\hat{\omega}$  плоча за различите односе  $a/h$ ,  $a/b$

У оквиру фазе 5, активност 9 анализирани су и тренутне могућности програмског пакета PAK Multiphysics и шта је неопходно урадити да би се омогућила примена СПХ-МКЕ повезивања у PAK-у за анализу реалних инжењерских проблема, како што је пражњење вагона. Закључено је да је потребно знатно проширење могућности PAK-а, пре свега контактнoг алгоритма и алгоритма за креирање/брисање, активацију/деактивацију коначних елемената и СПХ честица. Такође, да би било могуће анализирати реалне, велике проблеме потребно је извршити паралелизацију СПХ потпрограма у оквиру PAK Multiphysics.



а) Почетак осипања у тренутку  $t=0.2s$

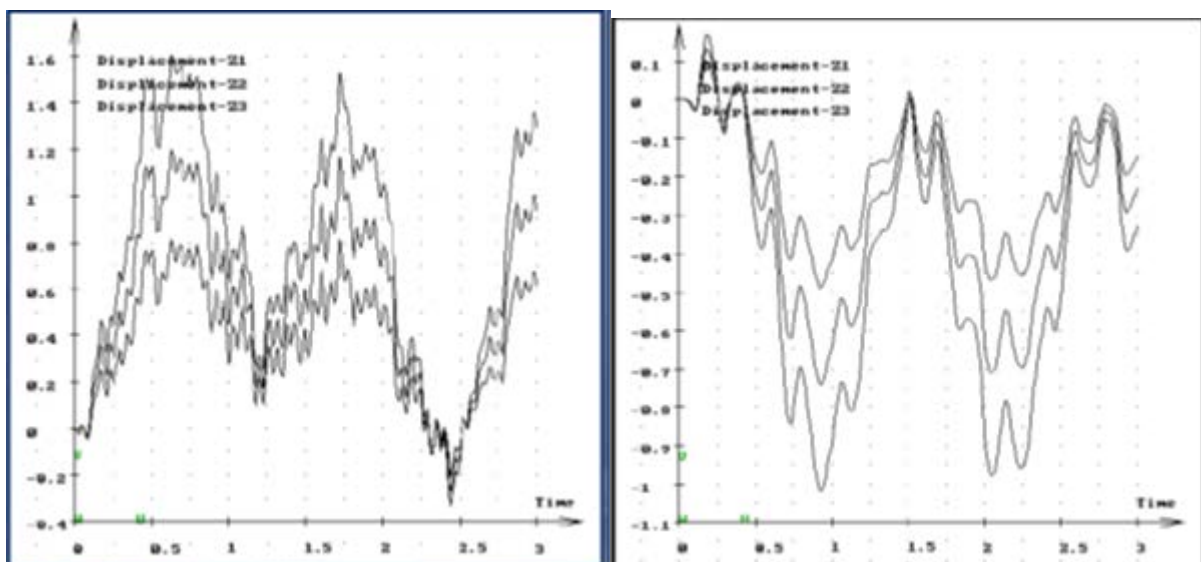


б) Изглед модела на крају прорачуна у тренутку  $t=1s$

Слика 12. Киповање грануларног материјала

### Фаза 6: Индустијска примена

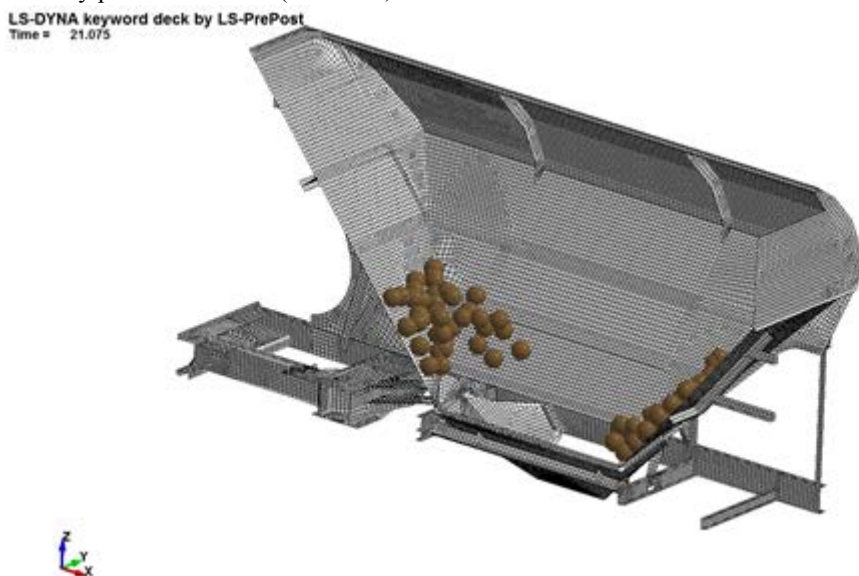
У оквиру фазе 6, активност 10 анализирано је нестационарно транслаторно кретање кранске дизалице. Анализирани кран се састоји од два главна носача са кутијастим профилем и има носивост од 32 тона. Динамички модел конструкције је формиран применом методе коначних елемената. Моделирање је извршено применом елемената греде и елемената љуске. Сви значајни динамички параметри су узети у обзир, динамичка оптерећења су дефинисана и динамичке једначине кретања су решаване. Варијације динамичких параметара у времену су анализирани у области убрзања, као и у области успорења (кочења) крана (Слика 7).



Слика 12: Закошење крана у области убрзања и успорења

У оквиру фазе 6, активност 11 коришћена је веза СПХ и МКЕ солвера у комерцијалном програму LS-DYNA за нумеричко моделирање пражњења теретних вагона за транспорт грануларних материјала. Код ових вагона, услед мањкавости дизајна, може доћи до таложења грануларног материјала на ивицама сандука и левка за пражњење.

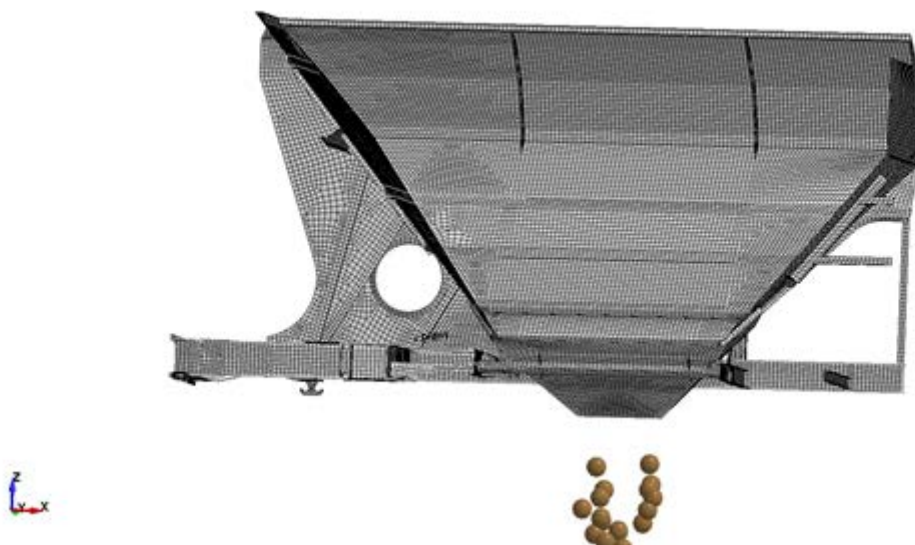
Методологија истраживања је обухватала одређивање материјалних карактеристика грануларног материјала које доводе до таложења материјала у нумеричком прорачуну које одговара таложењу материјала при пражњењу реалних вагона (слика 13).



Слика 13. Таложење грануларног материјала у вагону

Потом су анализирана могућа техничка решења која би за исте материјалне карактеристике грануларног материјала елиминисала његово таложење. Као најпрактичније решење, предложена је површинска обрада фарбањем унутрашњих страница сандука и левка чиме се смањује коефицијент трења са 0.55 на 0.45 и потпуно елиминише таложење материјала (Слика 14).

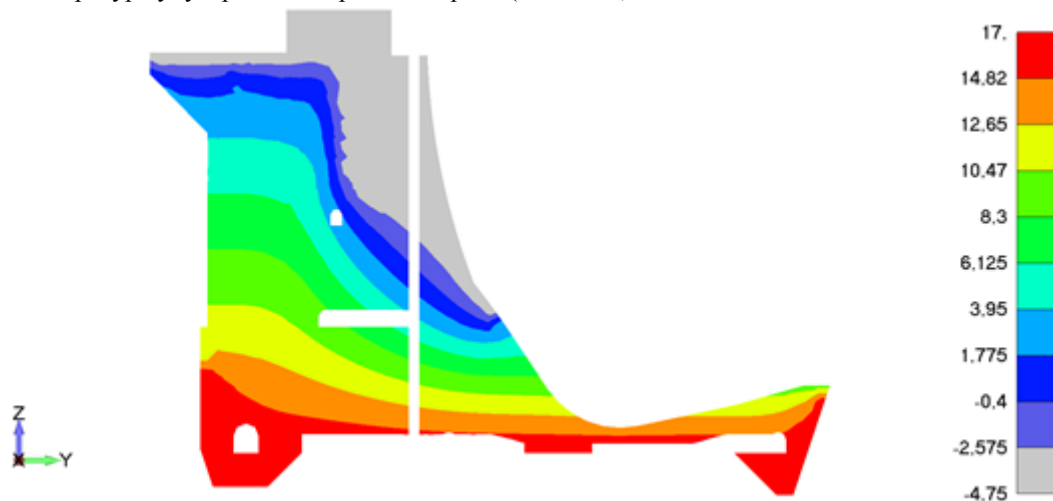
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
Time = 13.83



Слика 14. Потпуно пражњење вагона

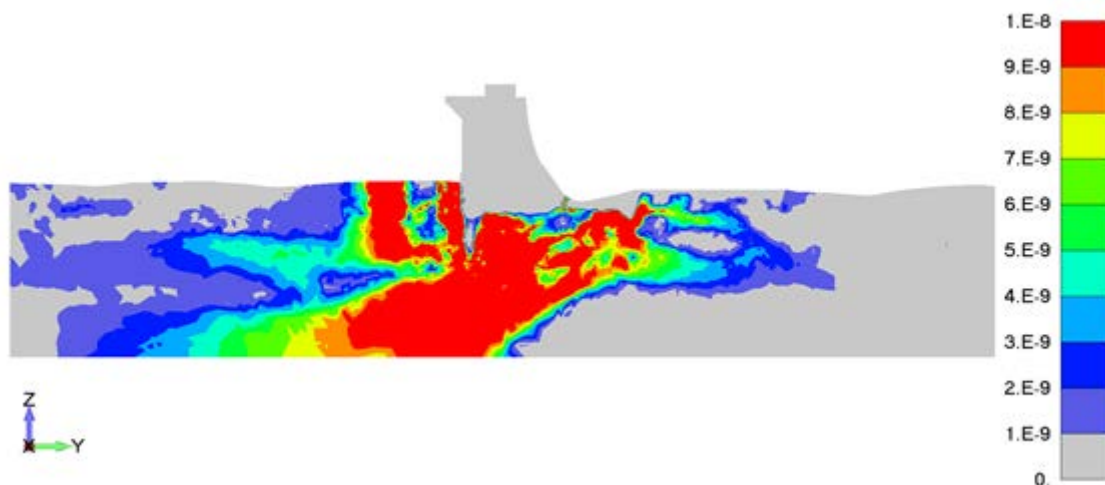
У оквиру фазе 6, активност 12 спроведени су прелиминарни прорачуни на МКЕ моделу преливне бране ХЕ „Ђердап 1“. МКЕ модел обухвата домен преливног дела бране од 14 ламела и припадајући део стенске масе. Анализиране су три врсте процеса: термичке, филтрационе и напонско-деформационе са одређеним могућностима међусобних спрезања. Овим анализама су добијени једнократни резултати поменутих процеса на МКЕ моделу за конкретне вредности параметара материјала, контурних услова и оптерећења како би се демонстрирале све перформансе и могућности формираног МКЕ модела. Циљ је првенствено био да се илуструју различите могућности МКЕ модела приказом појединих резултата.

Термички прорачун је спроведен на интегралном моделу свих 14 ламела преливног дела бране и то само на бетонском делу модела. Као улазни подаци задате су температуре ваздуха на неоквашеном делу бетона и температуре воде на оквашеном делу бране, а као резултат термичког прорачуна у ПАК-Т добијена је расподела температура унутар бетона преливне бране (Слика 15).



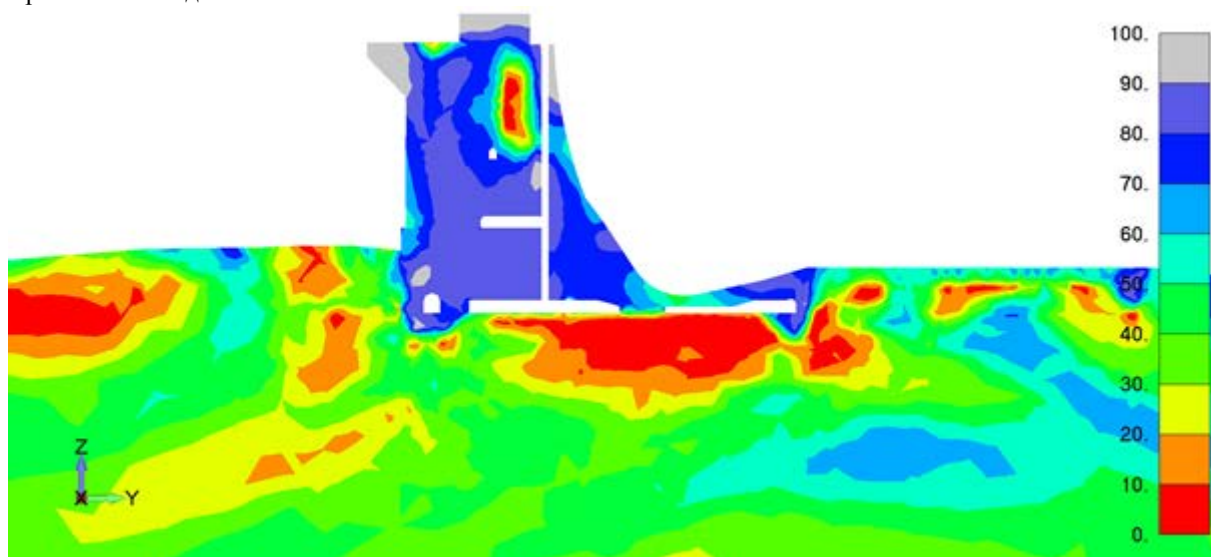
Слика 15. Температурско поље у подужном пресеку

Филтрациони прорачун је спроведен на интегралном МКЕ моделу свих 14 ламела укључујући и стенску масу (Слика 16). Као улазни подаци задате су коте горње и доње воде и функционалност дренажног система и фугенбанда. Рад дренажног система и фугенбанда се у моделу задат је тако што је појединим дренажним елементима омогућена пуна функционалност, делимична функционалност (0-1) или потуна нефункционалност.



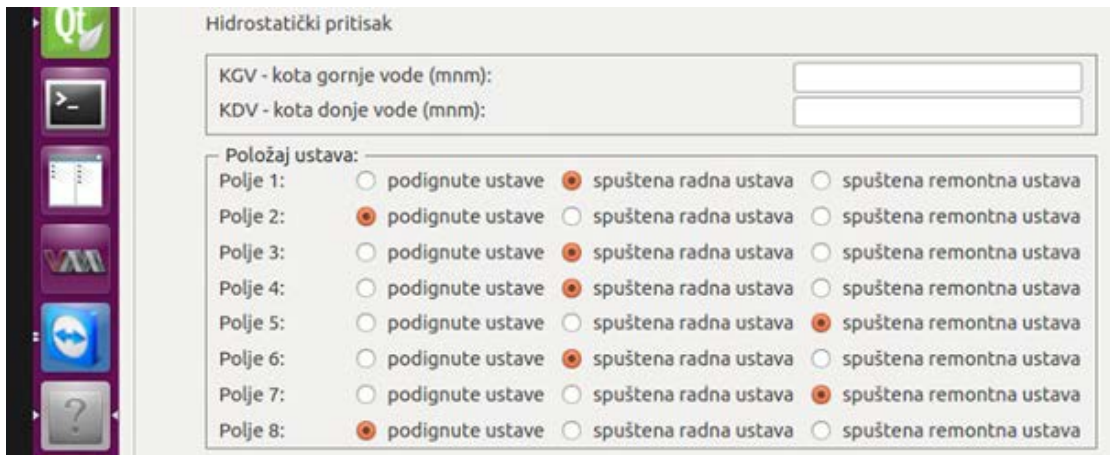
Слика 16. Брзина филтрације у подужном пресеку бране

Напонско-деформациона анализа се спроведена на делу МКЕ модела и то интегрално на 3 ламеле са припадајућом стенском масом испод ламела (Слика 17). При напонско-деформационој анализи коришћени су резултати термичког прорачуна, тако што се температуре добијене у термичкој анализи унутар бетона коришћене као улаз у напонско-деформациони прорачун. Филтрационе сила добијене као резултат филтрационе анализе такође представљају улаз у напонско-деформациону анализу као вектор чворних сила у мрежи МКЕ модела.

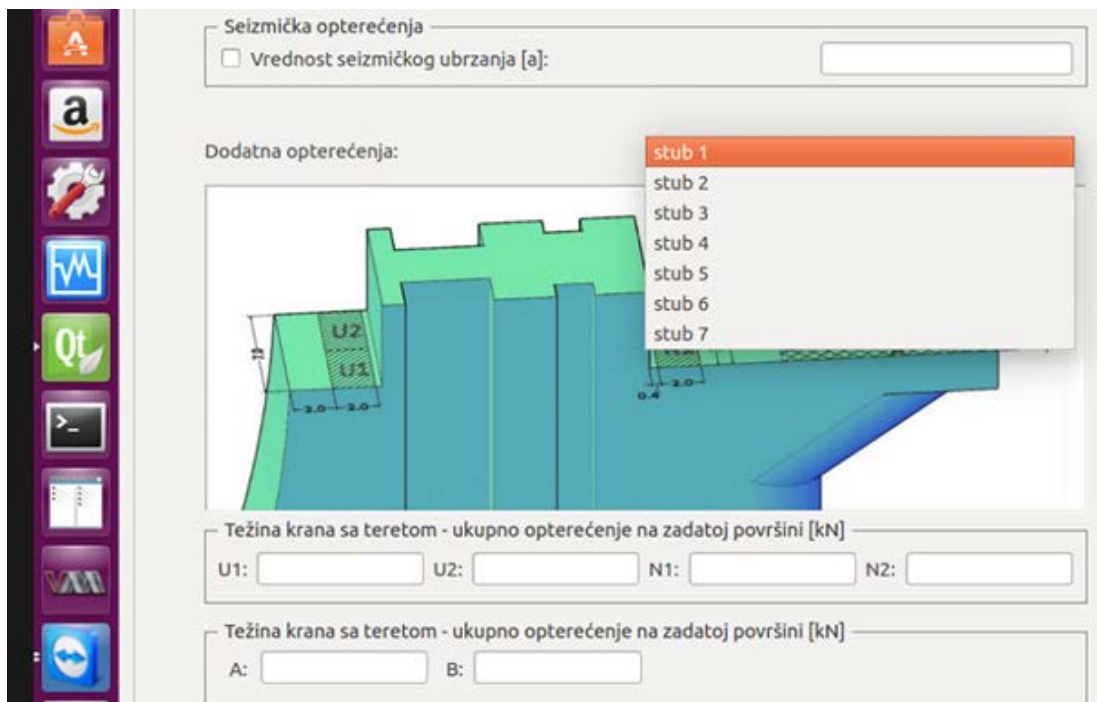


Слика 17. Удаљење од површи течења у подужном пресеку

У оквиру фазе 6, активности 13 развијен је кориснички интерфејс за задавање оптерећења, граничних услова, спровођење анализе и приказ резултата на моделу бране ХЕ Ђердап 1 (Слике 18 и 19). Кориснички интерфејс је направљен са циљем да инжењерима који немају пуно искуства са МКЕ анализама олакша коришћење софтвера PAK-Multiphysics.



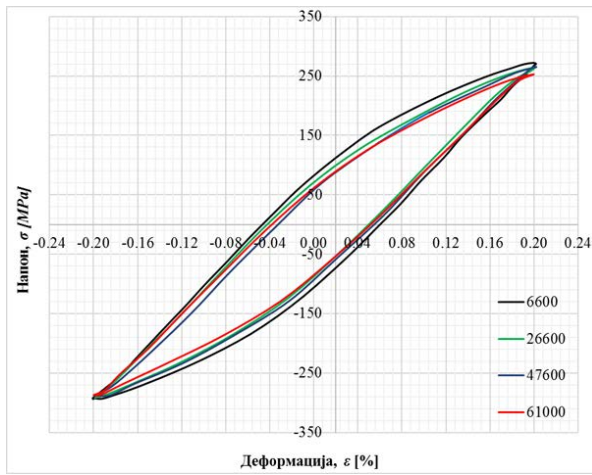
Слика 18. Изглед интерфејса за управљање уставима на преливној брани



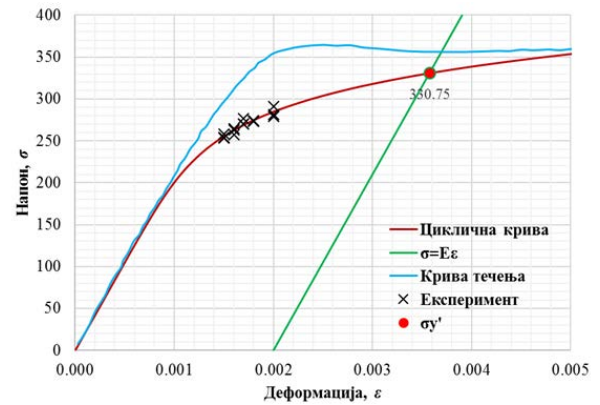
Слика 19. Изглед интерфејса за задавање сеизмичких и додатних оптерећења

У оквиру фазе 6, активност 14 израђена је корисничка документација са детаљним упутством за употребу развијеног софтвера у области рачунске механике солида, са више верификационих примера. У оквиру ове документација нумеричка решења су поређена са теоријским решењима као и са решењима добијеним применом других софтвера. Корисничка упутства детаљно описују структуру улазних фајлова за прорачун солида, на основу којих корисник може да врши измене у улазним подацима, као и детаљна упутства за опис структуре излазних фајлова.

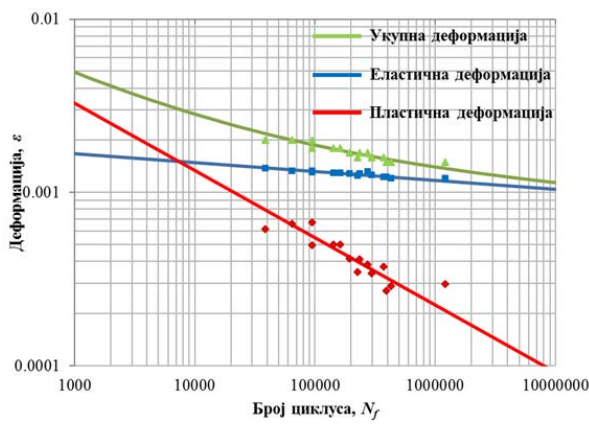
У оквиру фазе 6, активности 15 извршен је развој методологије за нумеричку процену интегритета носећих делова конструкције вагона који су изложени променљивом динамичком оптерећењу. Ова активност је реализована на основу базе података добијене експерименталним одређивањем карактеристика материјала на сервопулзатору добијеном у оквиру набавке капиталне опреме од стране Министарства. Развијена методологија је потврђена на конкретним примерима пројектовања, израде и тестирања вагонских конструкција.



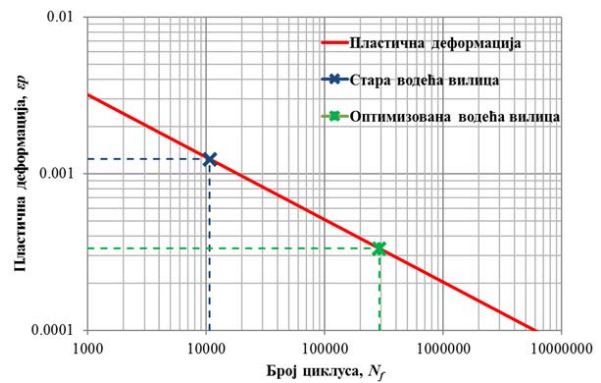
а)



б)



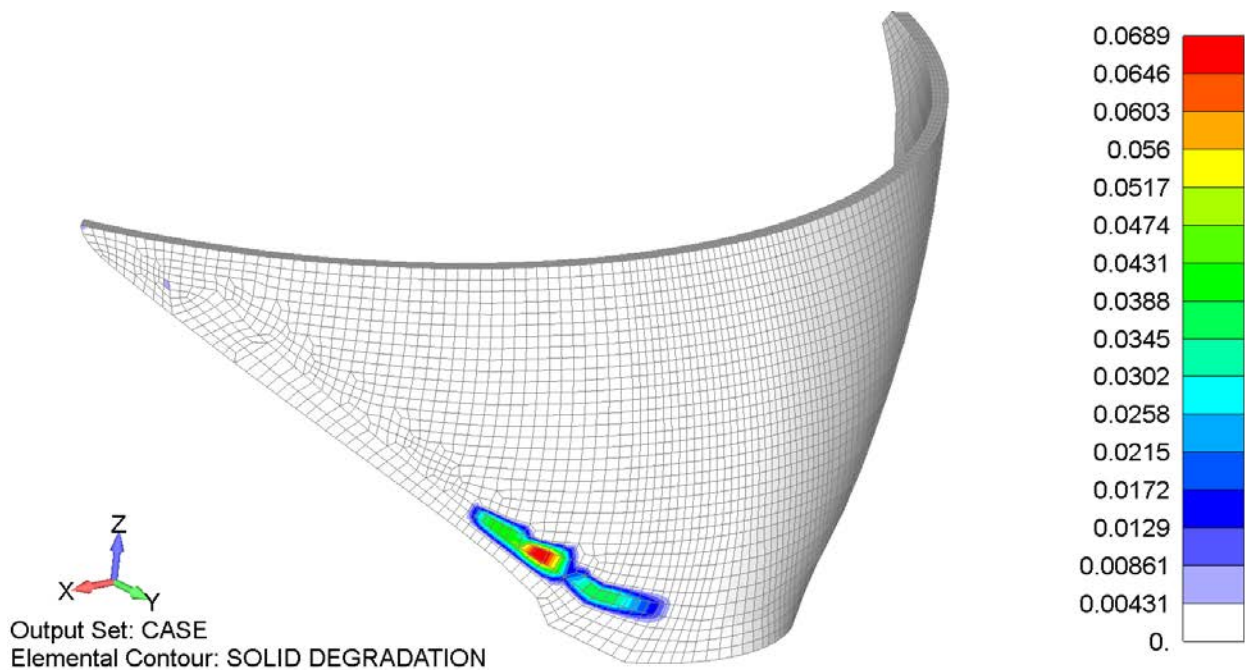
в)



г)

Слика 20. Нумеричка процена интегритета носећих делова конструкције вагона који су изложени променљивом динамичком оптерећењу а) Криве хистерезиса једне од испитиваних епрувета, б) Циклична крива зависности напон – деформација при једноосном чисто наизменичном променљивом оптерећењу материјала S355J2+N, в)  $\epsilon$ -N криве једноосног цикличног истезања-сабијања материјала S355J2+N, г) Дијаграм односа пластичне деформације и броја циклуса за челик S355J2+N добијен еластопластичном анализом старе и оптимизоване водеће вилице Нсртгс ауто вагона

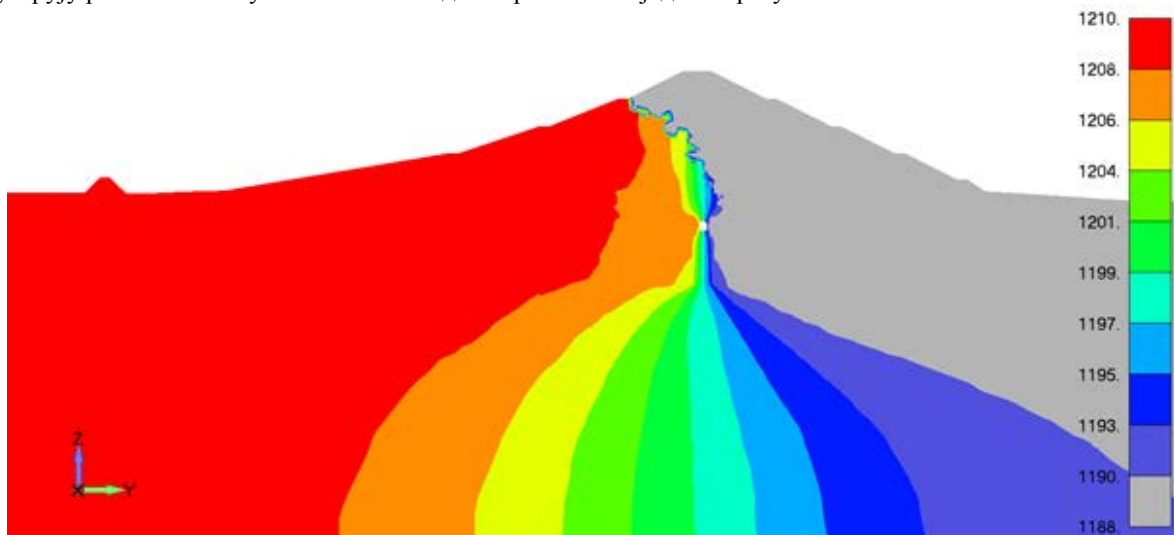
У оквиру фазе 6, активност 16 је на моделу бране Гранчарево тестирана функционалност материјалног модела бетона са оштећењем. Овај модел је коришћен као верификација функционалности материјалног модела бетона на реалним конструкцијама чије је понашање испитивано коришћењем других материјалних модела. На слици је приказано поље оштећења које одговара пољу пластичне деформације које је добијено коришћењем материјалног модела Хук-Браун (Слика 21).



Слика 21. Деградација бетона

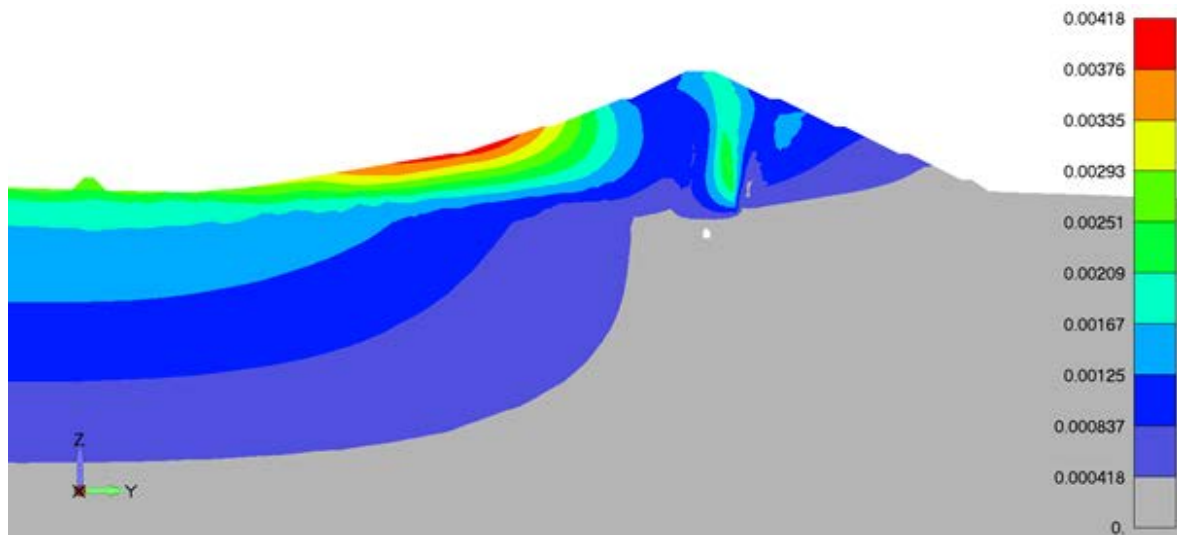
У оквиру фазе 6, активност 17, је на основу примедби корисника извршена модификација и унапређење корисничке апликације за задавање оптерећења, граничних услова, спровођење анализе и приказ резултата анализе бране ХЕ Ђердап 1.

У оквиру фазе 6, активност 18 спроведене су прелиминарне анализе и приказани резултати на МКЕ моделу бране Власина. МКЕ модел је обухватио две врсте процеса: филтрационе и напонско-деформационе са одређеним могућностима међусобних спрезања. Добијени резултати представљају анализу поменутих процеса на МКЕ моделу за конкретне вредности параметара материјала, контурних услова и оптерећења како би се демонстрирале све перформансе и могућности формираног МКЕ модела. Циљ је био да се илуструју различите могућности МКЕ модела приказом појединих резултата.



Слика 22. Филтрациона анализа - пијезометарски ниво

Филтрациони прорачун је спроведен само у једном стању, тако што су задати контурни услови по котам горње и доње воде (Слика 21). Као резултат анализе добијене су филтрационе силе за задато стање контурних услова. Напонско-деформациони прорачун је спроведен за два прорачунска стања и то: нулто и произвољно (Слика 22). Нулто стање се односи на тренутак изградње бране. При том стању се сматра да је акумулација празна. У том стању од оптерећења постоји само сопствена тежина објекта. Као резултат напонско-деформационог прорачуна добијена су поља деформација и напона услед сопствене тежине.

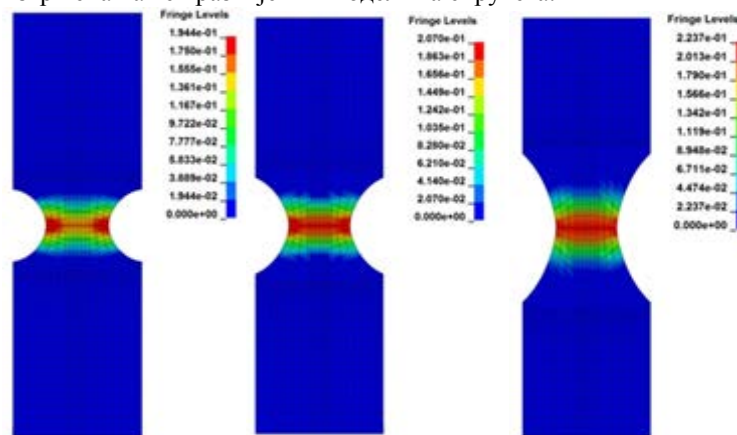


Слика 23. Напонско-деформациона анализа – поље укупног померања

Произвољно стање је одређено посматрано стање за одређене контурне услове по филтрацији и напону. Код вршења прорачуна све деформације из нултог стања се анулирају, а напонско стање се памти. На тај начин су деформације коју су добијене при некој прорачунској ситуацији, последица задатих контурних услова, а деформације које су се десиле у току грађења се анулирају.

У оквиру фазе 6, активност 19 израђена је корисничка документација са детаљним упутством за употребу софтвера PAK-Multiphysics у области рачунске механике флуида, са више верификационих примера. У оквиру ове документација нумеричка решења су поређена са теоријским решењима као и са решењима добијеним применом других софтвера. Корисничка упутства детаљно описују структуру улазних фајлова модула за прорачун флуида, на основу којих корисник може да врши измене у улазним подацима, као и детаљна упутства за опис структуре излазних фајлова.

У оквиру фазе 6, активности 20, развијен је део методологије за одређивање параметара течења материјала ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $n$  и  $m$ ) и параметара лома ( $D1$ ,  $D2$ ,  $D3$ ) челика повећане чврстоће базиран на нумеричким симулацијама квазистатичког и динамичког затезања епрувета (Слика 24). На тај начин стекли су се услови за наставак развоја методологије са реалним епруветима, како би се одредили конкретни параметри, чија калибрација би била извршена на већ развијеним моделима епрувета.



Слика 24. Ефективна пластична деформација пре лома за епрувете са различитим пречником зареза

### Фаза 7: Менаџмент пројекта

У оквиру фазе 7 руководилац је управљао пројектом са циљем успостављања ефикасности и квалитета рада на пројекту техничким и административним менаџментом, при чему се водило рачуна да финансијска средства буду правилно утрошена. На редовним састанцима учесници пројекта су презентовали резултате до

којих се дошло радећи на активностима дефинисаним пројектом. На овај начин вршен је надзор над свим активностима. На састанцима су учесници добијали задатке, везане за активности на пројекту. Поред овог начина размене информација, сви учесници пројекта су свакодневно били у контакту са руководиоцем пројекта.

У оквиру ове фазе је такође вршена промоција резултата пројекта. Промовисани су резултати свих реализованих активности које су предвиђене планом. За потребе партиципаната урађено је више студија у којима су презентоване могућности програмског система РАК-Multiphysics, чиме су партиципантима презентоване нове могућности развијеног софтвера. О могућностима програмског система информисани су и други потенцијални корисници за које је урађено више студија.

На Web порталу Лабораторије за инжењерски софтвер Факултета инжењерских наука, постављена је секција (<http://fempak.fink.rs/en/en/>) са релевантним информацијама везаним за пројекат (резиме, опис пројекта, фазе и активности, кључни резултати), радови објављени као резултат реализовања активности на пројекту (са могућношћу преузимања) и документацијом реализованих техничких решења. Секције сајта се редовно ажурирају актуелним информацијама.

## **2. Преглед резултата који нису реализовани са образложењем и прогнозом рока њихове реализације.**

У току шесте године реализације пројекта реализоване су све пројектом предвиђене активности.

## **3. Преглед резултата који директно омогућују наставак реализације пројекта.**

Остварени резултати у шестој години истраживања су детаљно изложени у претходном поглављу. Ови резултати представљају наставак пројектних активности из претходних пет година реализације пројекта и основу за реализацију пројектних активности предвиђених за седму годину пројекта. Као што је то био случај са првих пет година истраживања, све активности предвиђене за шесту годину истраживања су реализоване у потпуности. Такође, започета је реализација појединих активности предвиђених за седму годину реализације пројекта, што представља гаранцију да ће се све преостале активности успешно реализовати.

## **4. Оцена успешности реализације пројекта и утицај резултата на даље активности и завршетак целог пројекта.**

Преглед резултата остварених у шестој години реализације пројекта су дати у поглављу 2.1. У табели 2.1 су приказани остварени резултати у шестој години. Из табеле 2.1 се може видети да је остварено знатно више резултата него што је планирано у шестој години истраживања. Анализом активности у шестој години истраживања може се закључити да су све планиране активности реализоване у потпуности. Софтверски систем РАК-Multiphysics, је у многим областима на нивоу светски познатих али вишеструко скупљих софтверских решења за решавање мултифизичких проблема, и у потпуности задовољава потребе партиципаната, што потврђује велики број студија урађених за њихове потребе. Развијени софтвер је у потпуности подржан пратећом документацијом и одржавањем. Реализатор истраживања, пружа техничку подршку корисницима софтвера, као и услуге обуке за његово коришћење.

На основу публикованих резултата који се односе на предвиђене активности у седмој години реализације пројекта може се видети да су неке активности већ у фази реализације. На основу наведеног може се закључити да постигнути резултати представљају добру основу и гаранцију за успешну реализацију активности у наставку пројекта.

## **5. Оцена корисника о успешности реализације пројекта и утицај резултата на даље активности и завршетак целог пројекта. Уколико имате корисника (партиципанта) приложите уз овај извештај оцену корисника (мишљење) о успешности реализације пројекта и утицај резултата на даље активности и завршетак целог пројекта (посебан прилог на меморандуму корисника).**

Своју оцену о успешности реализације пројекта и утицај остварених резултата на даље активности и завршетак целог пројекта, корисници (партиципанти) на пројекту су дали у оквиру својих мишљења који су приложени као додаци годишњег извештаја рада на пројекту за 2016. годину.