

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. Институт за водопривреду „Јарослав Черни“
2. Про Раил д.о.о.
3. Милановић Инжењеринг д.о.о.
4. ЈП Електропривреда Србије
5. ППТ-Наменска АД
6. ИЦ Инжењеринг д.о.о.
7. АТБ Север д.о.о.

Број месеци истраживача: 156

Трајање пројекта: 48 месеци

## **1. Обавезе дефинисане Анексом II Уговора о реализацији пројекта ТР32036 за 2013. годину у оквиру Програма истраживања у области технолошког развоја за период од 01.01.2013 – 31.12.2013. године**

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

Циљ пројекта је да се развије домаћи комерцијални софтвер ПАК-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 ПАК-Multiphysics. Комплетна истраживања и предвиђене активности пројекта реализоваће се у периоду од 4 године у оквиру 7 фаза.

1. РАЗВОЈ СОФТВЕРСКИХ КОНЦЕПАТА ЗА СПРЕЗАЊЕ СОФТВЕРСКИХ МОДУЛА. Планиран је развој различитих софтверских концепата (секвенцијални и директни) за спрезање појединих софтверских модула. Секвенцијални приступ подразумева коришћење тзв. „middleware“ софтвера међу којима су најпознатији MpCCI (Mesh-based parallel Code Coupling Interface) и CTL (Component Template Library). CTL имплементација је базирана на C++ програмском језику, и представља шаблонску библиотеку као и STL (Standard Template Library). Могуће га је користити са C++ и FORTRAN кодом. Постоје два приступа секвенцијалног спрезања постојећег кода и то синхрони и асинхрони. Синхрони начин предвиђа убацивање комуникационих тачака у код, на местима где је неопходна размена података међу симулационим модулима које се извршавају. Асинхрони приступ предвиђа стандардизацију кода симулационих модула и њихово повезивање преко интерфејса. У оквиру секвенцијалног приступа предвиђено је решавање асинхроним приступом на два нивоа – слабој и јакој форми. Слаба форма предвиђа једносмерну спрегу два модула, док се јака форма односи на двосмерно спрезање. На овај начин могу бити решени и други проблеми као што је декомпозиција домена, модуларизација и паралелизација софтвера за дистрибуирану симулацију. Директни приступ подразумева развијање нових софтвера и метода решавања за сваки од спрегнутих проблема. За свако од спрегнутих физичких поља се додају одговарајуће једначине коначних елемената у једну матрицу и решавају се истовремено.

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, Hoek-Brown 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.

4. РЕИНЖЕЊЕРИНГ И РАЗВОЈ СОФТВЕРА ЗАСНОВАНОГ НА ПРОБЛЕМИМА ПОЉА. Предвиђено је прилагођавање софтверског модула за провођење топлоте и модула за струјање кроз порозне средине за повезивање са другим софтверским модулима, као и додатни развој ових и нових модула. Планирано је да се у софтверски модул за провођење топлоте имплементирају структурни елементи љуске и греде. Предвиђен је развој три нова модула и то за: магнетостатику, електростатику и ток једносмерне струје.

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 РАК-Multiphysics биће тестиран и верификован на многим тест примерима који се могу наћи у литератури, као и у корисничким упућствима са примерима које имају сви познати светски софтвери из ове области. У току реализације пројекта, развијени модули софтвера РАК-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. МЕНАѢМЕНТ ПРОЈЕКТА. У току целокупне реализације пројекта и развоја софтвера РАК-Multiphysics, предвиђена је и фаза која ће обухватати активности везане за технички и административни менаѢмент 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.

## **1.2. Циљ истраживања у трећој години (Прилог 1 Уговора).**

Циљ истраживања је да се развије софтверски систем РАК-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; реинжењеринг и развој софтвера заснованог на проблемима поља; спрезање и паралелизација појединих софтверских модула за механику чврстог тела, механику флуида, провођење топлоте, струјање кроз порозне средине; индустријска примена развијеног софтвера у решавању практичних проблема партиципаната.

## **1.3 Фазе и активности у трећој години истраживања (Прилог 1 Уговора)**

### **Фаза 1. РАЗВОЈ СОФТВЕРСКИХ КОНЦЕПАТА ЗА СПРЕЗАЊЕ СОФТВЕРСКИХ МОДУЛА**

Активност 5. Директни приступ

### **Фаза 2. РЕИНЖЕЊЕРИНГ И РАЗВОЈ СОФТВЕРА У ОБЛАСТИ РАЧУНСКЕ МЕХАНИКЕ СОЛИДА**

Активност 9. Адаптација и развој методе дискретних елемената

Активност 10. Развој проширене методе коначних елемената XFEM у хидро-механичким интеракцијама

### Фаза 3. РЕИНЖЕЊЕРИНГ И РАЗВОЈ СОФТВЕРА У ОБЛАСТИ РАЧУНСКЕ МЕХАНИКЕ ФЛУИДА

Активност 12. Спрезање СПХ дискретизационе методе са методом коначних елемената

### Фаза 4. РЕИНЖЕЊЕРИНГ И РАЗВОЈ СОФТВЕРА ЗАСНОВАНОГ НА ПРОБЛЕМИМА ПОЉА

Активност 17. Развој софтвера за магнетостатику

### Фаза 5. СПРЕЗАЊЕ И ПАРАЛЕЛИЗАЦИЈА ПОЈЕДИНИХ СОФТВЕРСКИХ МОДУЛА

Активност 22. Термо-механичко спрезање и верификација на моделирању радио-фреквентне аблације

Активност 23. Електро-механичко спрезање и верификација на моделирању пиезо-електричних давача

### Фаза 6. ИНДУСТИЈСКА ПРИМЕНА

Активност 27. Термо-механички прорачун бубња термоелектране „Морава“ као и њихово спрезање са пароводима

Активност 28. Прорачун интеракције флуида и структуре код пумпе високог притиска

### Фаза 7. МЕНАЏМЕНТ ПРОЈЕКТА

Активност 30. Технички и административни менаџмент

Активност 31. Промоција резултата пројекта

Активност 32. WEB сервиси

## 2. Реализација обавеза дефинисаних Уговором

У трећој години истраживања реализоване су све обавезе дефинисане Уговором, дате у поглављу 1. Развијени су сви предвиђени РАК модули. Развијени програмски модули и софтверски систем верификовани су и упоређени 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. Упоредо са развојем, прави се комплетна документација софтвера са свим потребним упутствима на енглеском и српском језику. Развијени и спрегнути РАК 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 1 наведени су предвиђени и остварени резултати на пројекту. Очигледно је да је знатно већи број резултата остварен него што је планиран. Тренутно је на пројекту ангажовано дванаест студента докторских студија, чије су докторске дисертације директно везане за реализацију пројекта.

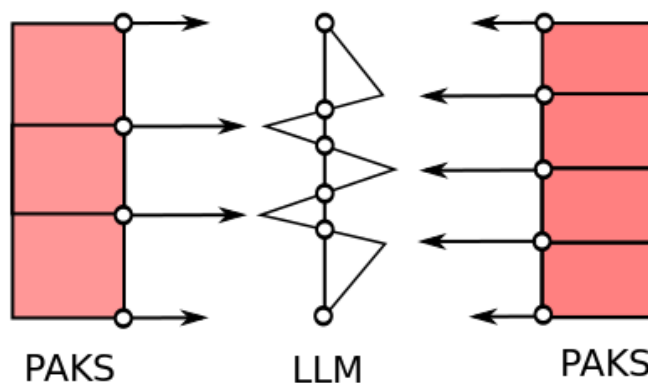
Табела 1. Предвиђени и остварени резултати у другој години истраживања

<i>Шифра</i>	<b>Врста резултата</b>	<b>Предвиђено</b>	<b>Остварено</b>
<b>M21</b>	Рад у врхунском међународном часопису	-	2
<b>M22</b>	Рад у истакнутом међународном часопису	-	1
<b>M23</b>	Рад у међународном часопису	4	11
<b>M25</b>	Рад међународном часопису који није на СЦИ ЛИСТИ	-	1
<b>M31</b>	Предавање по позиву са међународног скупа штампано у целини (неопходно позивно писмо)	-	1
<b>M33</b>	Саопштење са међународног скупа штампано у целини	12	47
<b>M34</b>	Саопштење са међународног скупа штампано у изводу	-	2
<b>M51</b>	Рад у водећем часопису националног значаја	-	6
<b>M52</b>	Рад у часопису националног значаја	-	5
<b>M63</b>	Саопштење са скупа националног значаја штампан у целини	-	1
<b>M71</b>	Одбрањена докторска дисертација	-	две у фази предаје и три у фази пријаве
<b>M85</b>	Прототип, нова метода, софтвер, стандардизовани или атестиран инструмент, нова генска проба, микроорганизми (уз доказ)	1	-
<b>M92</b>	Реализовани патент, сој, сорта или раса, архитектонско, грађевинско или урбанистичко ауторско дело	-	1
Укупно		17	78

## 2.1 Конкретан opis rezultata projekta, po aktivnostima i fazama, koji su ostvareni u izvешtaјnom periodu (do 15 stranica), sa uporeђењem sa obavezama i rezultatima definisanim Ugovorom:

### 2.1.1 Фаза 1-Развој софтверских концепата за спрезање софтверских модула

У оквиру активности 5 (Директни приступ) развијен је и унапређен концепт за спрезање домена са некомпатибилним мрежама. Након анализе актуелних радова, усвојена је као основа Локализовани Лагранжеови множиоци - ЛЛМ (Localized Lagrange Multipliers - LLM) који су коришћени за ову врсту спрезања. ЛЛМ се користе за пренос величина из једног домена у други, који не могу да буду директно пренети због различите дискретизације простора у тим доменима. Такође, могу се користити и код преклопљених домена, када постоји потреба за финијом дискретизацијом поддомена. Предности ове методе у односу на нелокализоване Лагражове множиоце је знатно мања меморијска захтевност, као и знатно мање време потребно за прорачун. Овај метод је анализиран и адаптиран за коришћење са ПАК софтверским модулима. У наредном периоду планира се проширење овог концепта за рад са доменима где се разликује временска дискретизација и имплементација на досада спрегнутим ПАК модулима.



Слика 2.1.1.1. Генерисање мреже ЛЛМ интерфејса коришћењем дијаграма момента

За потребе развоја софтвера за нумеричку електромагнетичку ПАК-М, извршено је спрезање коришћењем STL библиотеке развијене на Техничком факултету у Брауншвајгу, са којим постоји сарадња кроз пројекат Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије и ДААД. За потребе спрезања, претходно развијени алгоритам за термо-механичко спрезање је адаптиран за потребе решавања електромагнетно-механичких проблема. Постигнути резултати су верфиковани поређењем са примерима из литературе.

### 2.1.2 Фаза 2-Ренижењеринг и развој софтвера у области рачунске механике солида

У оквиру активности 9 (Адаптација и развој методе дискретних елемената) анализиране су тренутне могућности програмског пакета ПАК-Multiphysics за моделирање материјала који су изложени великим деформацијама (грануларни материјали). Метода коначних елемената носи са собом велике изазове у погледу тачности решења који су последица великих дисторзија мреже, тако да је за њихово моделирање препоручљиво користити неку од безмрежних метода као што су глатка честична хидродинамика (Smoothed Particle Hydrodynamics - SPH) или метода дискретних елемената (Discrete Element Method - DEM). На основу резултата анализе потреба за моделирањем грануларних материјала и већ постојећих светски признатих комерцијалних решења одлучен је правац даљег развоја програмског пакета ПАК-Multiphysics који обухвата повезивање за безмрежним методом. У оквиру ове активности анализиране су сличности и разлике, предности и мане метода SPH и DEM. Иако се приликом визуелизације резултата може стећи утисак да су ове две методе веома сличне, оне се фундаментално разликују.

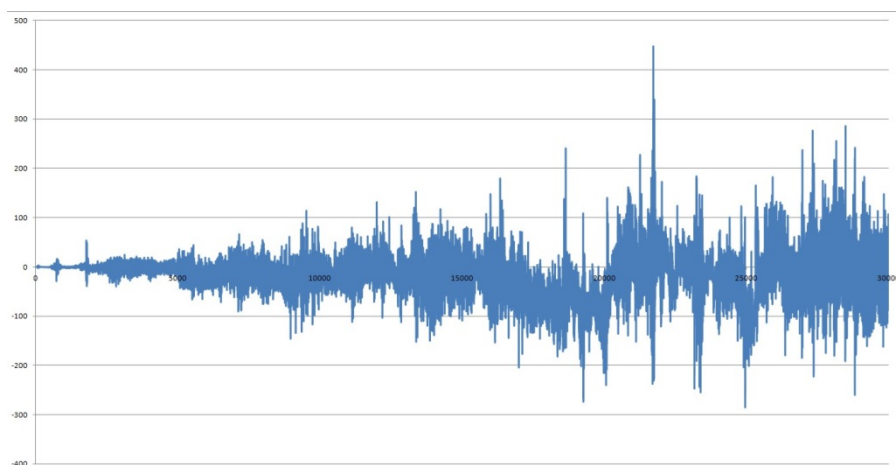
SPH метода је заснована на апроксимацији материјала у континуум (као и метода коначних елемената примењена у ПАК-Multiphysics ) тако да куглице које се виде приликом визуелизације у ствари представљају апроксимацију локалног материјала у псеудо честицу (куглицу). Овом методом се превазилазе проблеми који произилазе из великих дисторзија мреже код методе коначних елемената али је и даље присутна апроксимација великог броја реалних честица у континуум. Детаљно проучавање понашања грануларних материјала захтева употребу метода које не користе поменути апроксимацију већ се заснивају на анализи кретања сваке честице грануларног материјала као што је то случај у Методи Дискретних Елемената (Discrete Element Method - DEM). Током истраживања DEM методе у оквиру активности 9 уочен је општепознати недостатак DEM методе: велика компјутерска захтевност, јер експлицитна интеграција којом се рачунају непознате вредности у DEM методи захтева веома велики број изузетно малих временских корака. У оквиру активности 9 анализирано је понашање грануларних материјала у квазистатичким проблемима за које су карактеристичне осцилације, слично као и у

молекуларној динамици, па се анализом осцилаторних промена величина у DEM методи тежи проналажењу одговарајуће апроксимације која би на глобалном нивоу и даље верно осликавала понашање материјала док би се са доста већим временским кораком апроксимирало осцилаторно кретање честица. Због велике хардверске захтевности DEM методе анализирање могућих апроксимација у временској интеграцији је тренутно ограничено на 2Д проблеме. На слици 2.1.2.1. приказан је случај биаксијалног сабијања грануларног материјала (песка). Компресија се врши задавањем померања горње и доње граничне плоче до максималне деформације од 20%. Дејство суседног материјала је моделирано задавањем притиска од 0,1МПа на вертикалним границама модела.



Слика 2.1.2.1. Биаксијално сабијање грануларног материјала а) недеформисано стање, б) стање модела на крају, прорачуна

Силе које карактеришу узајамно дејство честица су комбинација нелинеарно еластичних Hertz-ових сила, сила пригушења и сила трења. Hertz-ове силе настају услед продора честица једних у друге током кретања честица. Велики временски корак проузрокује велики продор и самим тим и силу док се са смањивањем корака брже јавља Hertz-ова сила (мањег интензитета) која се супротставља даљем продору тако да су осцилације сила мање. На Слици 2.1.2.2. дат је приказ нормализоване хоризонталне компоненте силе у насумично изабраној честици.



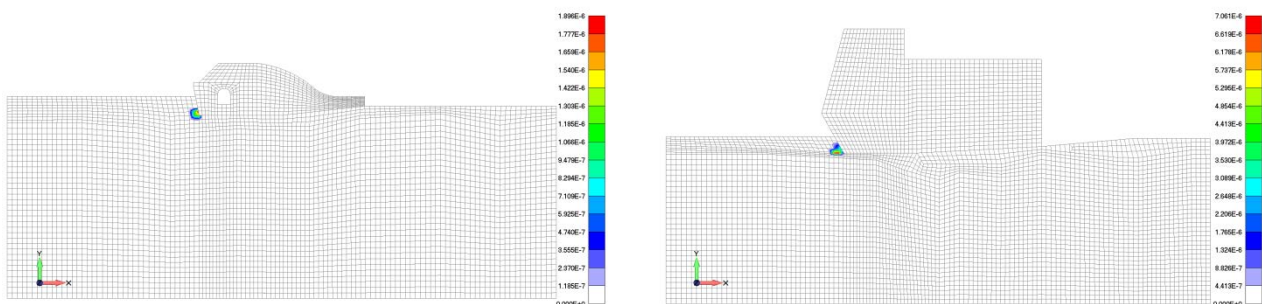
Слика 2.1.2.2. Промена вредности нормализоване хоризонталне силе у честици током симулације

Фокус истраживања у наредном периоду је проналажење одговарајуће апроксимације приликом интеграције чиме би се знатно повећала применљивост DEM методе смањивањем њене хардверске захтевности.

У оквиру активности 10 (Развој и примена проширене методе коначних елемената XFEM у хидромеханичким интеракцијама), као наставак на прошлогодишња истраживања, развијена XFEM метода примењивана је за напонско-деформацијске анализе стена и бетона са прелинама. Анализирана је стабилност десет бетонских гравитационих брана на реци Ибар. На сликама 2.1.2.3 и 2.1.2.4 приказани су резултати, за поље померања и поље пластичне деформације, за преливни и непреливни део бране Бојанићи.



Слика 2.1.2.3. Поље укупног померања преливног и непреливног дела бране „Бојанићи“



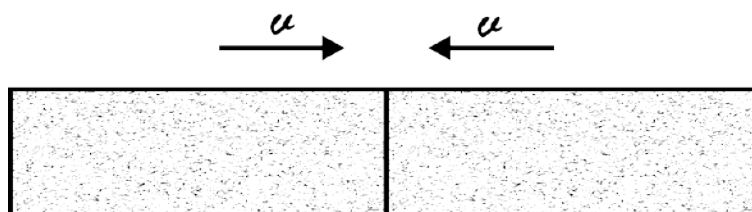
Слика 2.1.2.4. Поље пластичне деформације у преливном и непреливном делу бране „Бојанићи“

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

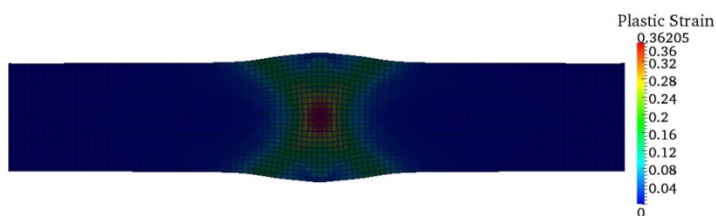
У оквиру активности 12 (Спрезање SPH дискретизационе методе са методом коначних елемената) врши се проширивање функционалности програмског пакета PAK-Multiphysics на основу захтева за моделирање материјала који нису погодни за представљање методом коначних елемената неком другом методом и укључивање тако добијених резултата у прорачун који се врши методом коначних елемената. Пример таквих материјала су грануларни материјали, који се често јављају у многим гранама привреде, као што су прехранбена индустрија (шећер, брашно, пшеница, итд), рударство (угаљ, креч и друге руде), грађевинарство (песак, шљунак).

Ова активност је уско повезана са активношћу 9 фазе 2 која се фокусира на детаљну анализу понашања грануларних материјала. Карактеристика ових материјала је да се они у одређеним условима понашају као течност док се у другим понашају као чврста тела а најчешће испољавају истовремено особине и течности и чврстих тела што је и уочено приликом DEM симулација. Због таквих особина грануларни материјали испољавају велике деформације које је тешко адекватно моделирати методом коначних елемената јер би то довело до великих дисторзија мреже и нетачних резултата. За моделирање грануларних материјала погодније су безмрежне методе као што је глатка честична хидродинамика (Smoothed Particle Hydrodynamics - SPH).

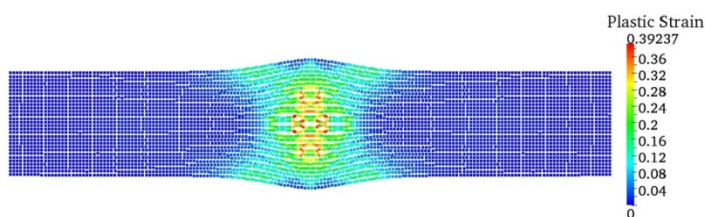
У оквиру активности 12 тестирана је SPH метода која се првенствено користи за симулације у области компјутерске динамике флуида, али последњих година налази и све већу примену у анализи проблема механике солида. Да би се моделирао грануларни материјал у SPH методи модификована је и проширена SPH метода да би се решавали проблеми механике солида. У ту сврху еластични и еластопластични материјални модел је уграђен у SPH код чиме је омогућена употреба SPH кода у механици солида. Тачност SPH методе је верификована поређењем резултата са методом коначних елемената на примеру судара плоча при великим брзинама. Циљ је да се у наредном периоду на основу искуства стеченог приликом уградње еласто-пластичног материјалног модела угради материјални модел који би на веран начин представио понашање грануларних материјала (песка, шљунка, угља) чиме би били створени услови за моделирање уређаја за транспорт и обраду грануларних материјала коришћењем спреге методе коначних елемената са безмрежном SPH методом. На основу постигнутих резултата објављен је рад M33 у коме је дато поређење MKE са SPH методом у којој је имплементиран еластопластични материјални модел. На Слици 2.1.3.1. приказани су шематски приказ моделираног проблема, пластична деформација добијена методом коначних елемената и SPH методом.



а)



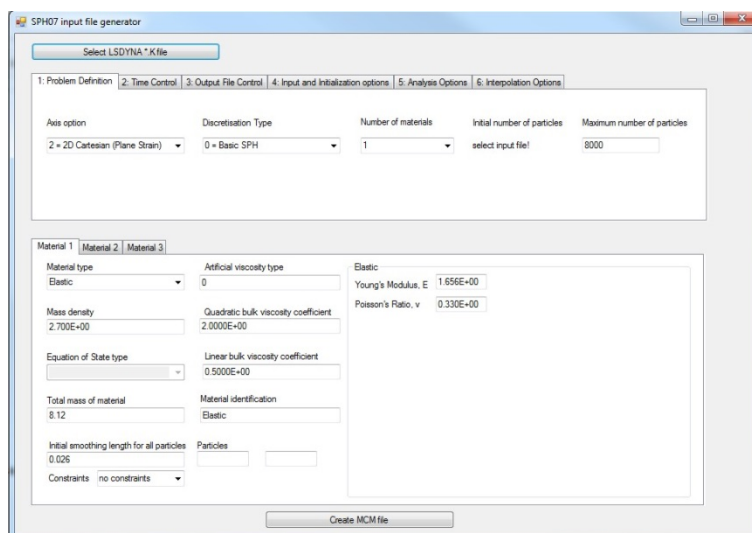
б)



ц)

Слика 2.1.3.1. Судар металних плоча при великим брзинама а) шематски приказ проблема, б) резултати добијени методом коначних елемената, ц) резултати добијени SPH методом

Да би тестирање, а касније и коришћење SPH методе у прорачунима реалних проблема било што једноставније, у оквиру ове активности је започет и развој софтвера за претпроцесирање односно креирање улазне датотеке за SPH програм у којој се налазе сви неопходни улазни параметри и подаци. За креирање SPH геометрије користи се бесплатни програм LS-PrePost који се користи за креирање улазних датотека за програм LS-Dyna. Овако креирана геометрија се учитава у програм за претпроцесирање који креира улазну датотеку на основу података које корисник уноси у главном прозору програма за претпроцесирање Слика 2.1.3.2.



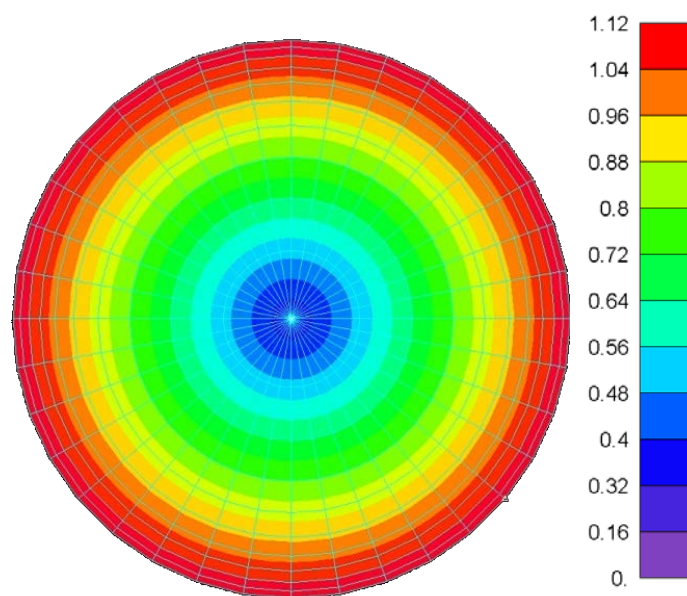
Слика 2.1.3.2. Интерфејс програма за претпроцесирање SPH геометрије и параметара анализе

#### 2.1.4 Фаза 4-Реинжењеринг и развој софтвера заснованог на проблемима поља

У оквиру активности 17 развијен је софтверски модул ПАК-М за прорачун магнетостатичког поља. За потребе нискофреквентних проблема, за израчунавање величина магнетног поља, коришћен је подскуп Максвелових

једначина, који чине Био-Саваров закон (дивергенција густине магнетног флукса је једнака нули) и Амперов закон (ротор магнетног поља је једнак густини електричне густине). Софтвер се користи за одређивање величина које карактеришу магнетостатичко поље, као што су интензитет поља, густина магнетског флукса, сила, магнетни момент, индуктивност, применом методе коначних елемената (МКЕ) за произвољне геометрије домена и произвољне граничне услове. Развијени софтвер је писан у FORTRAN-у на основу теоријских формулација магнетостатике, изведених за нумеричку интеграцију применом методе коначних елемената. Софтвер је тестиран на примерима из литературе и направљено је корисничко упутство са верификационим примерима. Развијени софтверски модул ПАК-М, у поређењу са другим комерцијалним, едукативним и софтверима отвореног кода који су били доступни, има сличне могућности и даје поуздане резултате при нумеричким прорачунима. До краја реализације пројекта наставиће се са даљом надградњом софтверског модула ПАК-М како би се достигао ниво познатих светских софтвера (COMSOL ACDC, ANSYS Maxwell, Adina EM, QuickField, FEMM, GetDP).

Развијени софтверски модул користиће се као посебан софтвер и као модул програмског пакета ПАК-Multiphysics. Упутство за примену софтвера урађено је по узору на упутства светски признатих софтвера. Резултати истраживања презентирани су на међународној конференцији (М33) и студент је одбранио завршни рад из ове области. На слици 2.1.4.1 приказано је магнетно поље константног извора струје одређено софтвером ПАК-М.



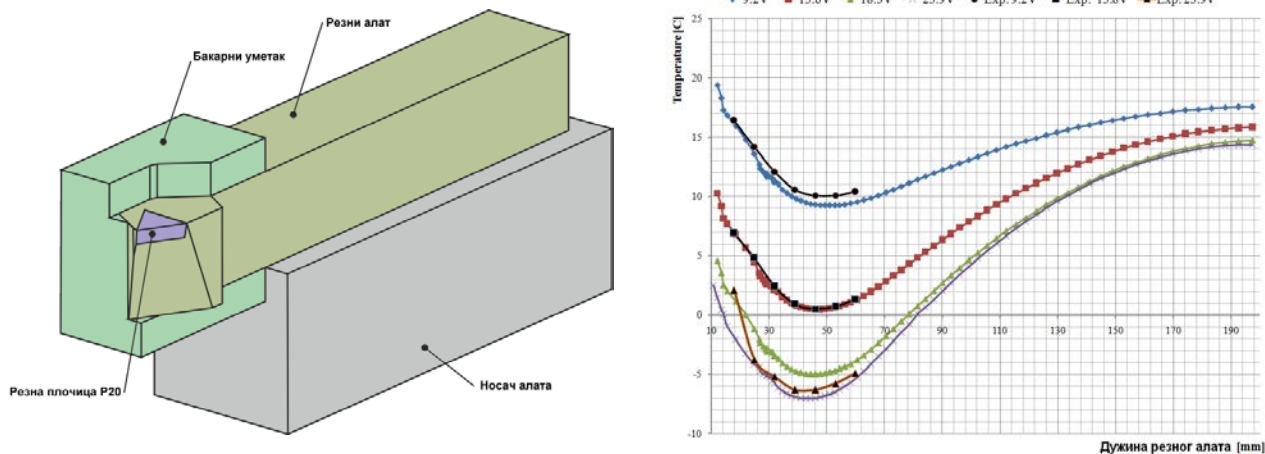
Слика 2.1.4.1. Магнетно поље константног извора струје

### 2.1.5 Фаза 5-Спрезање и паралелизација појединих софтверских модула

Након успешно реализоване активности 18 у претходним годинама истраживања и повезивања софтвера за провођење топлоте и прорачун чврстоће и њиховог термо-механичког спрезања и паралелизације директно је омогућена реализација активности 22. У оквиру активности 22 моделирањем радиофреквентне аблације верификовано је термо-механичко спрезање претходно развијених софтверских модула. Радио фреквентна аблација (РФА) је медицински поступак у коме део електропроводног система срца, тумора или неког другог нефункционалног ткива одстрањује користећи топлоту која се генерише протицањем наизменичне струје високе фреквенције. Извршена је РФА симулација радиофреквентне аблације на срцу употребом софтвера ПАК Multyphysics. Посматрана је расподела поља температуре кроз срце током аблације у случајевима када постоји проток крви кроз коронарне артерије и када проток крви не постоји. Показано је да проток крви кроз коронарну артерију нема значајан утицај на дистрибуцију температуре. Нумерички експерименти су потврдили применљивост радиофреквентне аблације при моделирању, симулацији, планирању и предвиђању резултата третмана. Резултати истраживања презентирани су на међународној конференцији (М33) и студент је одбранио завршни рад из ове области.

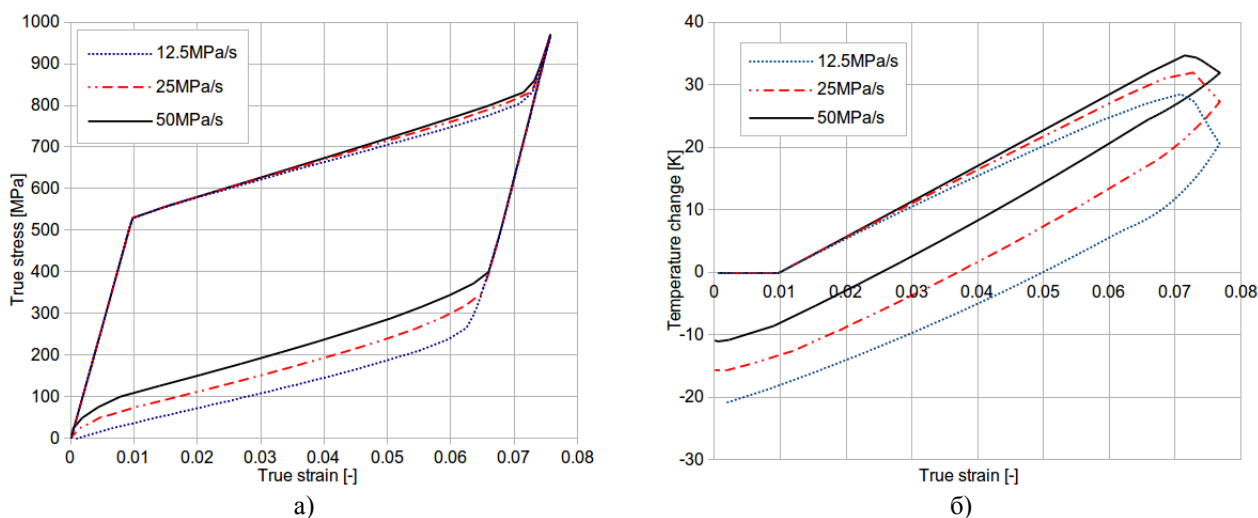
Термо-механичко спрезање је примењено у оквиру истраживања и моделирања рада нових система за хлађење резних алата на бази термоелектричних модула. Стандардном стругарском ножу за обраду метала додат је бакарни уметак на чијој задњој страни се налази термоелектрични модул (ТЕ модул). ТЕ модул се састоји од термоелемената који су спојени у једну целину и са спољашње стране обложени керамичким плочицама. При раду ТЕ модула, хладном страном се сматра страна која је окренута објекту из кога се црпи топлота, док се друга страна модула назива топла страна. Основу математичког модела за хлађење ТЕ модулом чине диференцијална једначина баланса енергије, Фуријеов закон провођења топлоте и рад термоелектричног модула.

Развијени математички модел је имплементиран у ПАК-Multiphysics којим су добијени нумерички резултати. Експериментално испитивање је вршено при различитим режимима рада ТЕ модула. Хлађење топле стране модула вршено је размењивачем топлоте на бази флуида, уз коришћење аутоматског регулатора температуре. Може се закључити да се развијени математички модел и развијени софтвер могу успешно користити за хлађење резних алата применом ТЕ модула пошто нумерички резултати имају добро слагање са експерименталним. На Слици 2.1.5.1. се може видети модел стругарског ножа и упоредни приказ расподеле температуре дуж резног алата. Резултати истраживања објављени су у међународном часопису (M23).

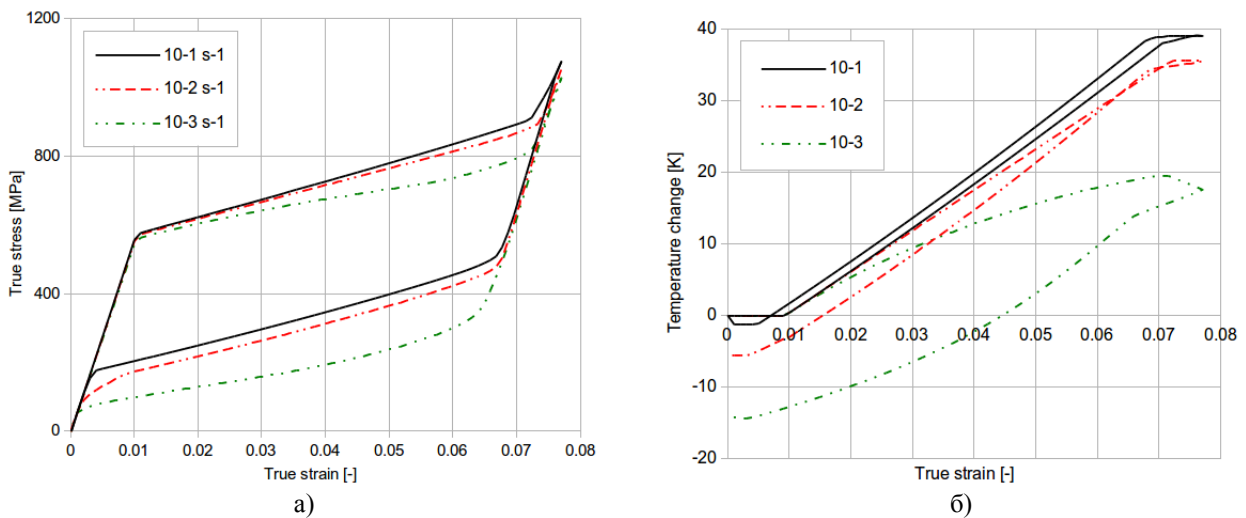


Слика 2.1.5.1. Модел стругарског ножа коришћен у испитивању и приказ расподеле температуре дуж резног алата

Поред тога, термо-механичко спрезање верификовано је и на моделирању понашања тзв. паметних материјала. Израз за енергију дисипације настале услед фазне трансформације је имплементиран у програм ПАК-S чиме је омогућено решавање термомеханичких проблема у употреби “паметних” материјала у спрези са програмом ПАК-T. Током августа и септембра 2013., истраживач Владимир Дунић је боравио на Институту за основна технолошка истраживања Пољске академије наука у Варшави у оквиру КММ-ВИН стипендије која му је одобрена ради неопходног истраживања на изради доктората и верификацији нумеричких резултата поређењем са експерименталним мерењима. Анализирани су примери различитих брзина оптерећивања који су контролисани константом брзином промене деформације у распону од  $10^{-1}s^{-1}$  до  $10^{-3}s^{-1}$ , односно напона од 50MPa/s до 12.5MPa/s. Као резултата овог заједничког истраживања припремљена су два научна рада чија се публикација у међународним часописима очекује у 2014. години. Током боравка на Институту, Владимир је такође одржао семинар на тему остварених резултата (<http://www.ippt.pan.pl/dzialalnosc-naukowa/seminaria/seminariazwm.html>) који су значајни за употребу легура “паметних” материјала у биоинжењерингу. Током семинара су представљени нумерички резултати остварени у оквиру пројекта коришћењем софтвера ПАК Multiphysics.



Слика 2.1.5.2. Нумерички резултати добијени коришћењем софтвера ПАК Multiphysics за случај задатог напона: а) напон - деформација б) температура промена - деформација



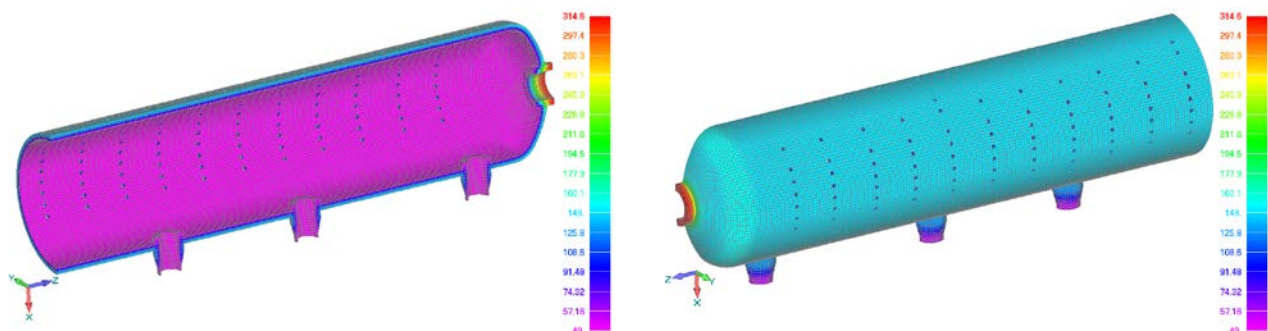
Слика 2.1.5.3. Нумерички резултати добијени коришћењем софтвера PAK Multiphysics за случај задате деформације: а) напон - деформација б) температурна промена - деформација

У оквиру активности 23, након повезивања софтвера за прорачун електростатичког поља и прорачун чврстоће и моделирањем пиезоелектричних давача верификовано је електро-механичко спрезање претходно развијених софтверских модула. У софтвер PAK Multiphysics је уграђена формулација коначних елемената за пиезоелектрична тела у вакууму. Анализирана је пиезоелектрична структура састављена од два пиезоелектрична актуатора спојена тако да образују сноп. Урађена је упоредна анализа методом коначних елемената у софтверима Adina и PAK Multiphysics. Компонента деформације у посматраној тачки одређена на основу нумеричке анализе добро се поклапа са вредношћу наведеној у литератури. Резултати истраживања презентирани су на међународној конференцији (M33) и објављен је рад у међународном часопису (M23).

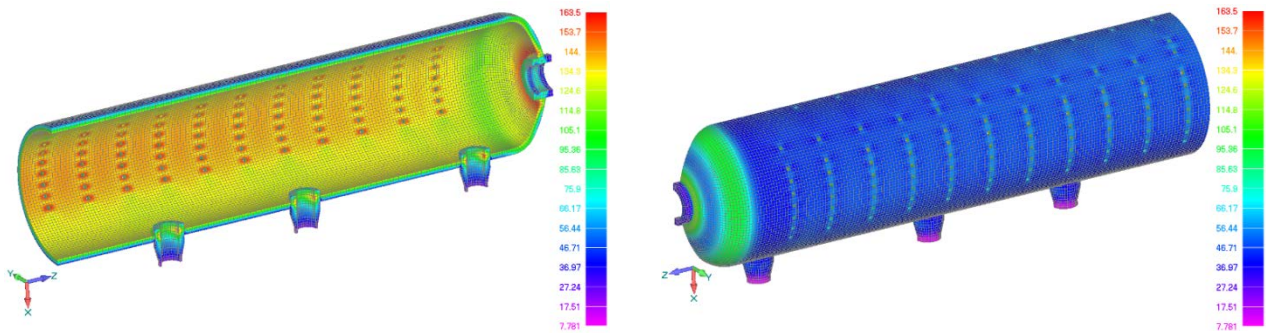
### 2.1.6 Фаза 6-Индустријска примена

У оквиру активности 27 за потребе партиципаната извршен је прорачун преосталог радног века бубња ТЕ „Морава“ 110MW. У циљу одређивања преосталог радног века бубња урађене су три стандардне варијанте прорачуна: 1) процена применом методе коначних елемената и дијаграма зависности деформација-број циклуса до појаве оштећења; 2) применом стандарда EN-12952-3; и 3) применом ТРД норми. Применом методе 2) и 3) добија се да је фактор искоришћености радног века око 50%, док се применом методе 1) не добијају релевантне пластичне деформације на местима концентрације напона за анализираних случајеве рада. Неопходно је имати у виду да начин одређивања напона у складу са стандардима не узима у обзир многа могућа стања која се појављују током рада постројења. Ово се посебно односи на нагле промене температуре које се јављају у условима хладног старта и испада и приликом корекција параметара рада бубња. На основу урађених анализа закључено је да се бубањ може и даље безбедно користити уз обавезу прегледа сваке године, при чему би се отклањала евентуална оштећења.

На слици 2.1.6.1. приказано је поље температуре на унутрашњој и спољашњој површини бубња 15 минута после хаварије. Поље напона 15 минута после хаварије на унутрашњој и спољашњој површини бубња приказано је на слици 2.1.6.2.

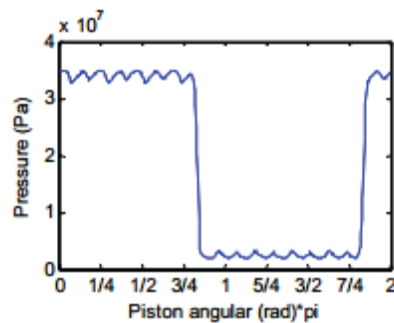


Слика 2.1.6.1. Поље температуре 15 мин. после хаварије



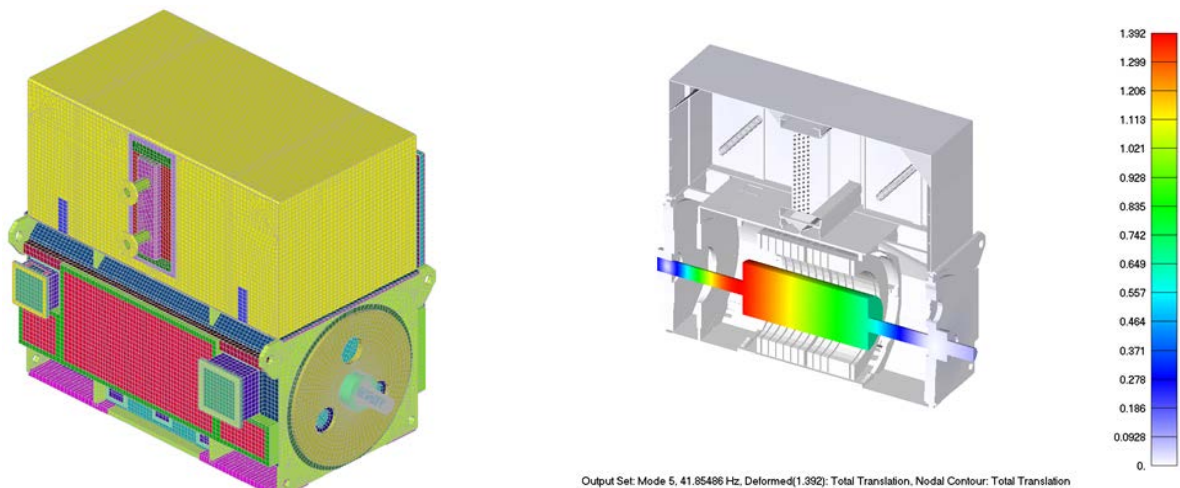
Слика 2.1.6.2. Поље напона 15 мин. после хаварије

Спрезањем софтверских модула за компјутерску динамику флуида ПАК-F и компјутерску динамику солида ПАК-S формиран је модул ПАК-FS. У оквиру активности 28 урађен је прорачун интеракције флуида и структуре код пумпе високог притиска. На слици 2.1.6.3. приказана је расподела притиска унутар коморе клипа пумпе високог притиска.



Слика 2.1.6.3. Притисак унутар коморе клипа пумпе високог притиска

За потребе партиципанта Север Суботица урађена је анализа високо напонског електромора типа 1.KV10450-2 NPP. МКЕ модел електромотора је приказана на слици 2.1.6.4а). Анализом је урађена потврда чврстоће конструкције услед сеизмичких оптерећења и магнетне силе. Магнетна сила је одређена софтверским модулом ПАК-М. За симулацију сеизмичких оптерећења на конструкцију задато је убрзање у вертикалном Z правцу (1.5g), и у хоризонталном правцу (0.5g). Разматрана су три случаја оптерећења: 1) хоризонтално оптерећење делује у X правцу; 2) хоризонтално оптерећење делује у Y правцу; 3) хоризонтално оптерећење делује у X и Y правцу. За сва три случаја вертикално убрзање је 1.5 g. Такође, урађена је модална анализа електромотора. Пети мод осциловања електромотора је приказан на слици 2.1.6.4б).



Слика 2.1.6.4. Електромотор 1.KV10450-2 NPP: а) МКЕ модел; б) пети мод (савијање ротора око Z осе)

У оквиру набавке капиталне опреме из кредита у октобру 2013.године испоручен је и инсталиран сервохидраулички мерни уређај SHIMADZU, приказан на слици 2.1.6.5. Обављена је почетна обука у оквиру статичког испитивања, док је завршетак обуке који обухвата динамичка испитивања, заказан за почетак фебруара 2014. године. Набавком сервохидрауличког мерног уређаја SHIMADZU и самосталном израдом уређаја за испитивање материјала при великим брзинама деформације, познатим под називом Хопкинсонов

штап, комплетирана је опрема и формиран Центар за инжењерски софтвер и динамичка испитивања на Факултету инжењерских наука. Формирањем центра учесницима пројекта пружају се могућности да убудуће своја већ стечена знања употпуне експерименталним испитивањима, као и да резултате експерименталних испитивања користе као поуздане улазне карактеристике материјала при прорачунима.



а)



б)

Слика 2.1.6.5. Сервохидраулички мерни уређај SHIMADZU на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу

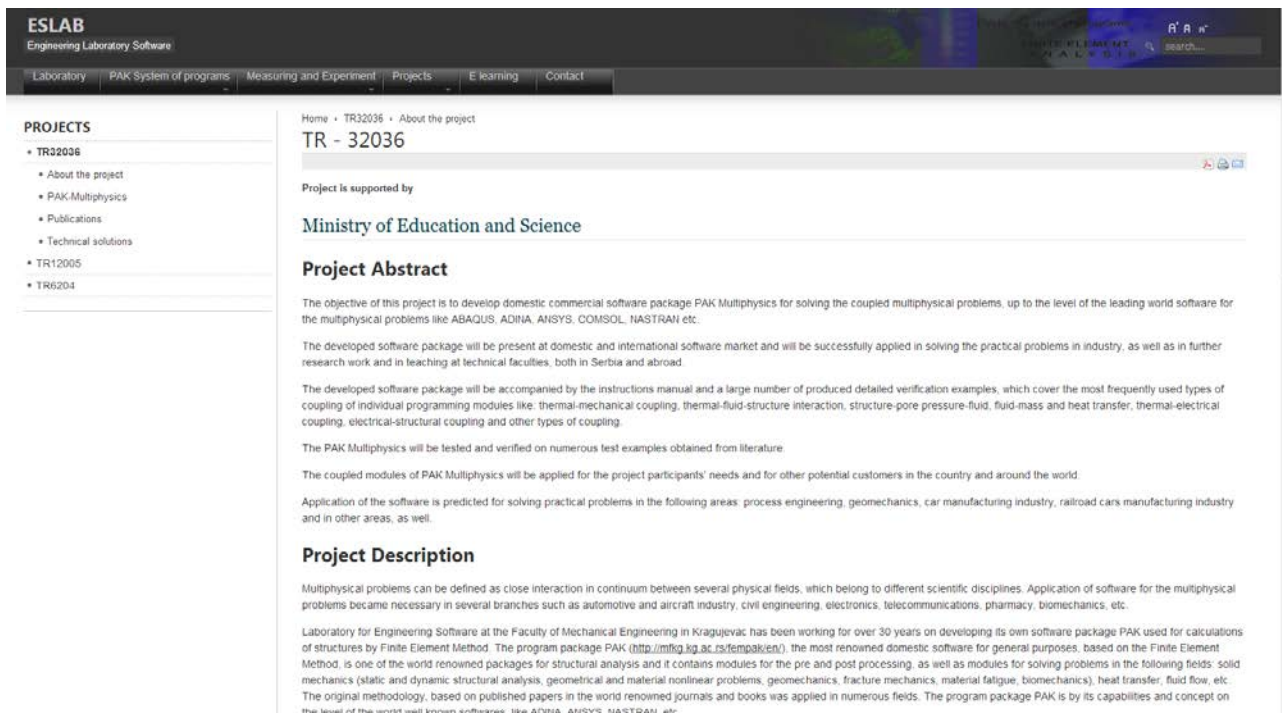
а) Сервопулзатор, б) Чилер за хлађење

### 2.1.7 Менаџмент пројекта

Руководилац пројекта је, у оквиру активности 30, управљао техничким и административним менаџментом са циљем успостављања ефикасности и квалитета рада на пројекту. При томе се водило рачуна да сва финансијска средства буду правилно распоређена и утрошена. На састанцима који су одржавани једном месечно су учесници пројекта презентовали резултате до којих се дошло радећи на активностима дефинисаним пројектом. На овај начин вршен је надзор реализације свих активности. Учесници ангажовани на пројекту су добијали и нове месечне задатке, везане за даље активности. Поред овог начина презентовања резултата и размене информација, сви учесници пројекта су свакодневно били у контакту са руководиоцем пројекта и међусобно преко е-маила и Skype.

У оквиру активности 31 вршена је промоција резултата пројекта. Промовисани су резултати свих претходно реализованих активности које су предвиђене пријавом пројекта. Применом развијеног софтверског система PAK-Multiphysics је реализовано више студија за потребе партиципаната. На овај начин су партиципантима презентоване нове могућности развијеног софтвера. О могућностима PAK-Multiphysics софтвера су информисани и други потенцијални корисници за које је урађено више студија. По позиву фирме „Ђуро Таковић“ специјална возила из Славонског Брода, Хрватска, одржана је презентација софтвера и промоција резултата пројекта 22.10.2013. По позиву Универзитета у Болоњи, Италија, проф. Мирослав Живковић и проф. Радован Славковић 16.12.2013. одржали су 4 предавања и извршили презентацију софтвера PAK-Multiphysics и промоцију резултата пројекта TR32036.

На Web порталу Лабораторије за инжењерски софтвер Факултета инжењерских наука, постављена је секција (<http://fempak.fink.rs/projects/TR/32036/>) са релевантним информацијама везаним за пројекат (резиме, опис пројекта, фазе и активности, кључни резултати) и радови објављени као резултат извршавања активности на пројекту. У односу на садржај који је описан у претходном извештају, садржај је обогаћен листом радова (са могућношћу преузимања) који су објављени током 2013. године, документацијом реализованих техничких решења, документацијом развијених софтвера.



Слика 2.1.7. Web сервис

## 2.2 Преглед резултата који директно омогућују наставак реализације пројекта

Остварени резултати у трећој години истраживања су детаљно изложени у претходном поглављу. Ови резултати представљају наставак пројектних активности из прве две године реализације пројекта и основу за реализацију пројектних активности предвиђених за четврту годину пројекта. Као што је то био случај са прве две године истраживања, све активности предвиђене за трећу годину истраживања су реализоване у потпуности. Такође, започета је реализација појединих активности предвиђених за четврту годину реализације пројекта, што представља гаранцију да ће се све преостале активности успешно реализовати.

## 2.3 Оцена успешности реализације пројекта и утицај резултата на даље активности и завршетак целог пројекта

Преглед резултата остварених у трећој години реализације пројекта су дати у поглављу 2.1. У табели 1 су приказани остварени резултати у трећој години. Из табеле 1 се може видети да је остварено знатно више резултата него што је планирано у трећој години истраживања. Анализом активности у трећој години истраживања може се закључити да су све планиране активности реализоване у потпуности. Софтверски систем PAK-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 четвртој 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.