

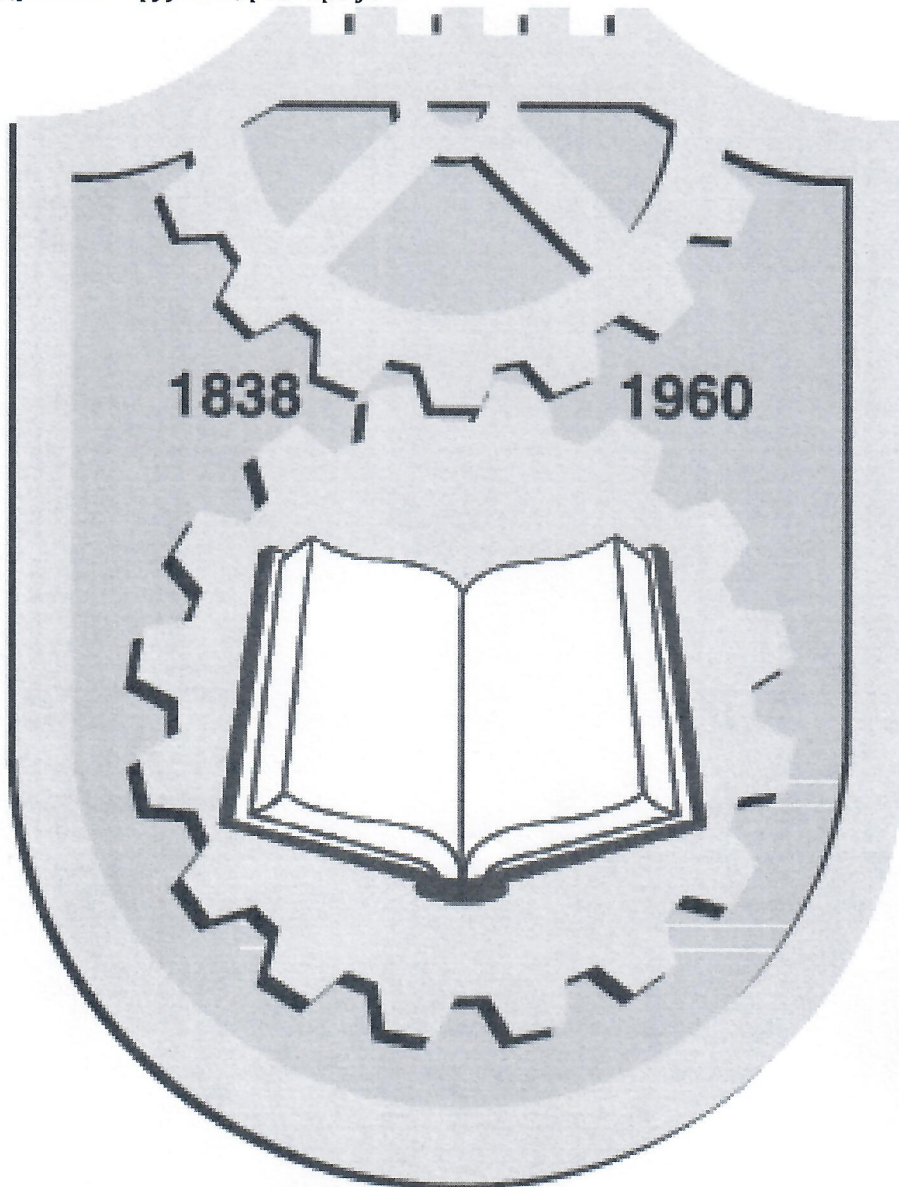
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА
УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ

ДОКУМЕНТАЦИЈА ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА М81

„Софтвер за решавање спрегнутих проблема ПАК- Мултифизикс“

Аутори техничког решења

- *Др Мирослав Живковић, ред. проф.*
- *Др Снежана Вуловић, научни сарадник*
- *Др Драган Ракић, доцент*
- *Др Владимир Дунић, доцент*
- *Др Ненад Грујовић, ред. проф.*



Крагујевац, 2019.

Врста техничког решења	М81 – Ново техничко решење примењено на међународном нивоу
Аутори техничког решења	Др Мирослав Живковић, редовни професор Др Снежана Вуловић, научни сарадник Др Драган Ракић, доцент Др Владимир Дунић, доцент Др Ненад Грујовић, редовни професор
Назив техничког решења	Софтвер за решавање спрегнутих проблема ПАК-Мултифизикс
Кључне речи	метод коначних елемената; МКЕ софтвер, нумеричка симулација; структурна анализа; анализа провођења топлоте; анализа филтрационих процеса; спрегнути мултифизички проблеми
За кога је рађено техничко решење	Софтвер развијен у оквиру националног пројекта, ТР32036 „Развој софтвера за решавање спрегнутих мултифизичких проблема“, Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије
Ко користи техничко решење	Институт за водопривреду „Јарослав Черни РС“, представништво у Бањој Луци, Република Српска, БиХ; Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд; Факултет инжењерски наука Универзитета у Крагујевцу
Година израде техничког решења	2011-2019.
Година када је почело да се примењује техничко решење и од кога	2016. година публикавања у врхунском међународном часопису; 2016. Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд; 2017, Институт за водопривреду „Јарослав Черни РС“, представништво у Бањој Луци, Република Српска, БиХ
Верификација резултата	Резултати су верификовани и публиковани у врхунском међународном часопису – Continuum Mechanics and Thermodynamics; Уговор о комерцијалној примени софтвера за прорачун безбедности бране „Гранчарево“, Република Српска, БиХ
Ко је прихватио техничко решење	Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Примена резултата	Област информационих технологија; Нов нумерички софтвер за симулацију спрегнутих мултифизичких проблема

1. Опис проблема који се решава техничким решењем

Техничко решење, софтвер ПАК-Мултифизикс, припада области информационих технологија, научно-техничких услуга, пројектовање и развој компјутерског софтвера.

Кључ успешне инжењерске симулације је развој модела који може да замени експеримент или прототип и да понуди прецизније разумевање анализиране конструкције или процеса. У прошлости, због недостатка прорачунских могућности, ефекат спрезања утицаја различитих физичких поља је занемариван или се узимао у обзир приближно. Укључивањем ефеката спрезања различитих физичких поља, симулација даје бољи увид у перформансе и понашање конструкције, што води економичнијем, поузданијем и сигурнијем производу.

Мултифизички проблеми се могу дефинисати као блиска интеракција између више физичких поља која припадају различитим инжењерским дисциплинама. Да би се одредио међусобни утицај различитих физичких поља, потребно је у истом проблему за исте контурне услове симултаним прорачунима одредити физичка поља и укључити њихову међусобну зависност.

Посебни захтеви за решавање наведених проблема јављају се у свим областима инжењерства, производње, истраживања и технике: анализа стабилности брана, железничка индустрија, аутомобилска индустрија, грађевинска индустрија, биомедицинска примена, хидраулички и пнеуматски системи, процес заваривања, итд. Софтвер ПАК-Мултифизикс је развијен са циљем да одговори овим захтевима и да путем нумеричких симулација пружи бољи увид у интеракцију различитих физичких поља.

2. Стање решености проблема у свету – приказ и анализа постојећих решења

Крајем 20 века, развој софтвера је тежио решењима за анализу једног физичког поља док је почетком 21. века тежиште пребачено на системски ниво и мултифизичке симулације. Уз напредак развоја производа, наметнула се и потреба за комплекснијим симулацијама које узимају у обзир интеракцију више физичких поља.

Све компаније које се баве развојем ове врсте софтвера су препознале ту потребу и развијају решења за ову намену. Коришћени приступи су: 1) симулација свих физичких поља у оквиру једног софтверског пакета или 2) повезивање више софтверских пакета помоћу неког од middleware решења које представљају интерфејс за размену података.

Софтвер ПАК-Мултифизикс развијен је по угледу на познате комерисијалне софтвере као што су: COMSOL Multiphysics, ANSYS Multiphysics, ADINA Multiphysics, ABAQUS Multiphysics, Kratos Multiphysics.

3. Суштина техничког решења

Софтвер ПАК-Мултифизикс омогућава решавање спрегнутих проблема у којима међусобни утицај имају различита физичка поља добијена структурном (напонско-деформационом) анализом, анализом провођења топлоте, анализом филтрационих процеса и других.

Мултифизички проблеми су математички описани системом спрегнутих парцијални диференцијалних једначина у оквиру истог софтверског решења или у оквиру више повезаних софтвера. Решавање овог система једначина је изазов који треба решити на што ефикаснији начин. Да би се обезбедио утицај једног физичког поља на друго, омогућена је размена информација између појединих солвера директним приступом или преко заједничких фајлова са подацима који су на располагању за даљи прорачун.

Термо-механичка анализа: Поље температуре утиче на деформације структуре, док те деформације изазивају даљу промену температуре. Структурна анализа, може да узима у обзир енергију дисипације услед деформисања, која утиче на промену температуре, док се у структурној анализи утицај промене температуре изима у обзир преко промене материјалних карактеристика и термичких деформација.

За термо-механичку спрегу је поред могућности записивања у фајл, примењена веза између два модула за термичку и структурну анализу коришћењем посредног софтвера тзв. middleware, који је у сарадњом са истраживачима са Institute for Scientific Computing, Technische Universität Braunschweig, из Немачке имплементиран у софтвер ПАК-Мултифизикс. Примењен је Блок Гаус-Зајдел алгоритам за јако спрезање [1] којим се врши размена података између два или више програма. Поред оваквог начина спрезања, омогућена је интеракција посредством излазног фајла из програма за анализу провођења топлоте, којим се дефинише термички контурни услов за структурну анализу.

Структурно-филтрациона анализа: Спроводи се у циљу решавања проблема интеракције између напонско-деформационих процеса и филтрационих процеса који су последица филтрације кроз порозну средину, као што је тло или биолошка ткива. Механичке деформације утичу на вредности порног притиска, а промена вредности порног притисака изазива промену механичке деформације. За ову врсту проблема је примењен приступ слабог спрезања коришћењем излазног фајла из филтрационе анализе са вредностима филтрационих сила. Филтрационе силе, које настају као последица порних притисака и градијента потенцијала, представљају улаз у софтвер за структурну анализу.

4. Детаљан опис техничког решења

ПАК-Мултифизикс садржи модуле за структурну (напонско-деформациону) анализу, анализу провођења топлоте и анализу филтрационих процеса, као и релације које дефинишу њихову међусобну интеракцију. Поменути модули решавају наведена поља физичких величина, при чему је остварена или директна веза између њих или веза коришћењем улазно-излазних фајлова. У сваком од модула су дефинисани одговарајући контурни услови који омогућавају прецизан опис проблема чија се симулација врши. Сваки модул има засебан улазни фајл у коме су дефинисани врста симулације, контурни услови, материјални подаци и слично.



Слика 1 Модули софтвера ПАК-Мултифизикс

Нумерички модули су сачињени од претпроцесора и МКЕ солвера. Задатак претпроцесора је припрема модела у форми потребној за коришћење у МКЕ солверу. На основу дефиниције геометрије модела, контурних услова, као и материјалних података, претпроцесор генерише улазни фајл за МКЕ анализу. Дефинисан проблем решавају одговарајући МКЕ солвери израчунавајући величине стања модела: температуре, градијенте, потенцијале, брзине, филтрационе силе, поља напона, поља повратних и неповратних деформација, померања и друго [2].

Солвер за анализу провођења топлоте

Нумерички солвер за анализу провођења топлоте ПАК-Т је развијен за решавање проблема нелинеарног нестационарног провођења топлоте кроз непрекидну средину (солид) методом коначних елемената, са произвољним контурним условима [3, 4]. Почетни контурни услови (почетне температуре) се задају само за нестационарне проблеме. Контурни услови у општем случају могу бити: задата температура, флукс, прелаз топлоте и зрачење. Сви процеси које описује МКЕ модел провођења топлоте могу се дефинисати кроз следећи скуп параметара: коефицијент провођења топлоте; коефицијент прелаза; коефицијент зрачења; специфична топлота. Поље температуре добијено анализом провођења топлоте може да се користи као улазна величина за термо-механички прорачун.

Коришћењем Фуријеовог закона о провођењу топлоте:

$$\mathbf{q} = -\mathbf{k}\nabla T, \quad (1)$$

енергетска равнотежна једначина се може извести у следећем облику:

$$-\rho c \frac{dT}{dt} + \nabla^T (\mathbf{k}\nabla T) + q + (q_{dis} - T_0 \alpha c_m \dot{\epsilon}_m) = 0 \quad (2)$$

где је q локални извор топлоте, \mathbf{k} је проводност материјала, ∇T градијент температуре, а q_{dis} елементарна енергија дисипације. Члан $-T_0 \alpha c_m \dot{\epsilon}_m$ представља Гауг-Цулов ефекат који се да температура опада када се материјал затеже и да расте када се материјал притиска. Референтна температура је T_0 . Елементарна енергија дисипације која се може претворити у топлоту у зависности од типа материјала може се израчунати нпр. за пластичност метала као [1]:

$$q_{dis} = \eta \bar{\sigma} \dot{\epsilon}_p \quad (3)$$

где су η фактор дисипације, $\bar{\sigma}$ ефективни напон и $\dot{\epsilon}_p$ ефективна брзина пластичне деформације.

Даље се једначина провођења топлоте може написати у матричној форми као:

$$\mathbf{C}\dot{\mathbf{T}} + \mathbf{K}\mathbf{T} = \mathbf{Q} \quad (4)$$

где је \mathbf{C} матрица специфичне топлоте, \mathbf{K} матрица која у себи садржи матрицу проводљивости, прелазности и радијације, док је \mathbf{Q} вектор који садржи топлотни флукс, конвекцију, радијацију и концентрисане топлотне изворе.

Солвер за филтрациону анализу

Нумерички солвер за анализу филтрационих процеса ПАК-П је развијен за решавање проблема струјања подземних вода кроз порозну непрекидну средину са произвољним граничним условима [5, 6]. Почетни услови (почетни потенцијал) се задају само за нестационарну анализу. Гранични услови могу бити: задат потенцијал, задат површински проток (флукс) и задат запремински извор/понор. Када се потенцијал и флукс мењају током времена, ради се о нестационарној филтрационој анализи.

Нумеричком анализом филтрационих процеса програмом ПАК-П се добијају следеће величине: потенцијал, градијент потенцијала, брзина флуида, проток у чворовима, запреминске силе. Запреминске силе се користе као улазне величине за анализу напонско-деформационих процеса (ПАК-С).

Табела 2. Алгоритам за инкременталне равнотежне итерације у програму ПАК-П

<p>1.</p>	<p>Гранични услови на почетку корака</p> <p>задат потенцијал површински проток (флукс)</p> <p>$\phi = \bar{\phi}(t)$ на Γ_1 $q_n = \mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \bar{q}(t)$ на Γ_2</p>
<p>2.</p>	<p>Равнотежне итерације на нивоу модела у кораку</p> <p>$i=0$</p> <p>$i = i + 1$</p> <p>Петља по елементима</p> <p style="padding-left: 20px;">Петља по интеграционим тачкама</p> <p style="padding-left: 20px;">рачунање матрице веза $\mathbf{B} = \nabla \mathbf{H}$</p> <p style="padding-left: 20px;">рачунање матрице филтрационе проводности</p> <p style="padding-left: 20px;">${}^{t+\Delta t} \mathbf{K}^{(i-1)} = \int_V \mathbf{B}^T {}^{t+\Delta t} \mathbf{k}^{(i-1)} \mathbf{B} dV$</p> <p style="padding-left: 20px;">рачунање матрице издашности ${}^{t+\Delta t} \mathbf{S}^{(i-1)} = \frac{1}{\Delta t} \int_V {}^{t+\Delta t} \mathbf{S}^{(i-1)} \mathbf{H}^T \mathbf{H} dV$</p> <p style="padding-left: 20px;">рачунање вектора протока од задатих спољашњих флуксева</p> <p style="padding-left: 20px;">${}^{t+\Delta t} \mathbf{f} = \int_V {}^{t+\Delta t} \mathbf{Q} \mathbf{H}^T dV - \int_A {}^{t+\Delta t} \bar{q} \mathbf{H}^T dA$</p> <p style="padding-left: 20px;">Одређивање прираштаја потенцијала и кориговање потенцијала</p> <p style="padding-left: 20px;">$({}^{t+\Delta t} \mathbf{K}^{(i-1)} + {}^{t+\Delta t} \mathbf{S}^{(i-1)}) \Delta \Phi^{(i)} = {}^{t+\Delta t} \mathbf{f} - {}^{t+\Delta t} \mathbf{f}^{u(i-1)}$</p> <p style="padding-left: 20px;">${}^{t+\Delta t} \Phi^{(i)} = {}^{t+\Delta t} \Phi^{(i-1)} + \Delta \Phi^{(i)}$</p> <p>Ако услови конвергенције нису испуњени, рачунање поновити у следећој итерацији.</p>
<p>3.</p>	<p>Одређивање вредности градијената потенцијала, Дарсијеве брзине, протока кроз задату контуру и запреминских сила</p> <p>- градијент потенцијала $\mathbf{i} = \mathbf{B} {}^{t+\Delta t} \Phi^{(i)}$</p> <p>- Дарсијева брзина $\mathbf{q} = -\mathbf{ki}$</p> <p>- проток у свим чворовима модела ${}^{t+\Delta t} \mathbf{f}^p = {}^{t+\Delta t} \mathbf{S}^{(i)} \left({}^{t+\Delta t} \Phi^{(i)} - {}^t \Phi \right) + {}^{t+\Delta t} \mathbf{K}^{(i)} {}^{t+\Delta t} \Phi^{(i)}$</p> <p>проток по контури једнак је алгебарском збиру протока по чворовима који чине контуру</p> <p>- запреминске силе $\mathbf{F}_V = -\int_V \gamma \mathbf{H}^T \mathbf{i} dV + \int_V \mathbf{B}^T p \mathbf{I} dV .$</p>

Солвер за структурну анализу

Нумерички солвер за структурну анализу ПАК-С представља модул за решавање линеарних и нелинеарних проблема (геометријски и материјално) изложених дејству статичких и динамичких врста оптерећења [7, 8]. Намењен је решавању проблема, као што су: материјална нелинеарност, геометријска нелинеарност, анализа стабилности, анализа посткритичног понашања конструкција, нелинеарна динамичка анализа, контактни проблеми, велика померања, велике деформације и друго. Солвер ПАК-С садржи више типова 1Д, 2Д и 3Д коначних елемената као и велики број материјалних модела. Коришћењем програма ПАК-С добијају се: померања, силе, напони, укупне деформације, пластичне деформације, удаљење од услова течења и друго.

При решавању нелинеарних проблема механике чврстог тела, полази се од претпоставке да је решење у дискретном временском тренутку t познато и потребно је наћи ново решење у дискретном тренутку времена $t + \Delta t$, где је Δt изабрани временски прираштај. Равнотежна једначина вектора спољашњих сила ${}^{t+\Delta t}\mathbf{R}$ и унутрашњих сила ${}^{t+\Delta t}\mathbf{F}$ за конфигурацију у тренутку $t + \Delta t$, има облик:

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{R} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{F} = 0 \quad (5)$$

Како је решење у тренутку t познато, може бити написана следећа једнакост:

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{F} = {}^t\mathbf{F} + \Delta\mathbf{F} \quad (6)$$

где је $\Delta\mathbf{F}$ прираштај унутрашњих чворних сила:

$$\Delta\mathbf{F} \approx {}^t\mathbf{K}\Delta\mathbf{U} \quad (7)$$

при чему је $\Delta\mathbf{U}$ вектор прираштаја чворних померања, док је ${}^t\mathbf{K}$ матрица крутости.

Применом (7), једначина (6) може бити представљена у облику:

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{F} \approx {}^t\mathbf{F} + {}^t\mathbf{K}\Delta\mathbf{U} \quad (8)$$

Заменом (8) у (5) добија се:

$${}^t\mathbf{K}\Delta\mathbf{U} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{R} - {}^t\mathbf{F} \quad (9)$$

одакле се израчунава прираштај померања $\Delta\mathbf{U}$ на основу кога се добија померање у тренутку $t + \Delta t$:

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{U} \approx {}^t\mathbf{U} + \Delta\mathbf{U} \quad (10)$$

које представља апроксимацију стварног померања услед коришћења апроксимација (7). Након одређивања померања у тренутку $t + \Delta t$, израчунава се напон и одговарајуће чворне силе у тренутку $t + \Delta t$, након чега се прелази у следећи временски корак.

При структурној анализи, модел може бити изложен и допунским оптерећењима као што су температура и филтрационе силе. Ова поља су добијена прорачуном провођења топлоте (ПАК-Т) и филтрационим прорачуном (ПАК-П).

Табела 1. Алгоритам (Њутн-Рапсон) решавања равнотежних једначина у ПАК-С

0. ${}^{t+\Delta t} \mathbf{u}^{(0)} = {}^t \mathbf{u}, i = 0$
1. ${}^{t+\Delta t} \mathbf{R} = {}^t \mathbf{R} + \Delta \mathbf{R}$
2. ${}^{t+\Delta t} \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} {}^{t+\Delta t} \mathbf{u}^{(i)}$
3. Интеграција напона ${}^{t+\Delta t} \boldsymbol{\sigma}^{(i)}$ у локалним итерацијама (материјални модели)
4. ${}^{t+\Delta t} \mathbf{F}^{(i)} = \int_V \mathbf{B}^T {}^{t+\Delta t} \boldsymbol{\sigma}^{(i)} dV$
5. $\mathbf{f}^{(i)} = {}^{t+\Delta t} \mathbf{F}^{(i)} - {}^{t+\Delta t} \mathbf{R}$
6. Уколико је $\ \mathbf{f}^{(i)}\ \leq tol \rightarrow$ решење је ${}^{t+\Delta t} \mathbf{u}^{(i)}$ и иди на следећи корак
7. Решавање $\left(\frac{d\mathbf{f}}{d {}^{t+\Delta t} \mathbf{u}} \right)^{(i)} \delta \mathbf{u} = -\mathbf{f}^{(i)}$ по $\delta \mathbf{u}$
8. ${}^{t+\Delta t} \mathbf{u}^{(i+1)} = {}^{t+\Delta t} \mathbf{u}^{(i)} + \delta \mathbf{u}$
9. $i \leftarrow i + 1$ иди на корак 2 овог алгоритма.

Имплементација алгоритма спрезања

Термо-филтрационо-механичка спрега може бити описана следећим системом једначина [1]:

$$\begin{aligned} f(\mathbf{u}, T, \mathbf{F}_V) &= 0 \\ g(\mathbf{u}, T) &= 0 \\ h(\mathbf{u}, \mathbf{F}_V) &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

где су f, g, h поља структурних, термичких и филтрационих величина. Проблем провођења топлоте се решава применом солвера ПАК-Т и резултат је поље температуре T , док се анализа филтрационих проблема врши применом солвера ПАК-П и резултат је поље запреминских сила \mathbf{F}_V за задате контурне услове. Проблем структурне анализе се врши применом солвера ПАК-С и решење је поље померања \mathbf{u} за дефинисано поље температуре, филтрационих сила и других механичких оптерећења.



Слика 2 Размена података између солвера за структурну, термичку и филтрациону анализу

Блок Гаус-Зајдел алгоритам решавања подразумева да су решења добијена на следећи начин [1]:

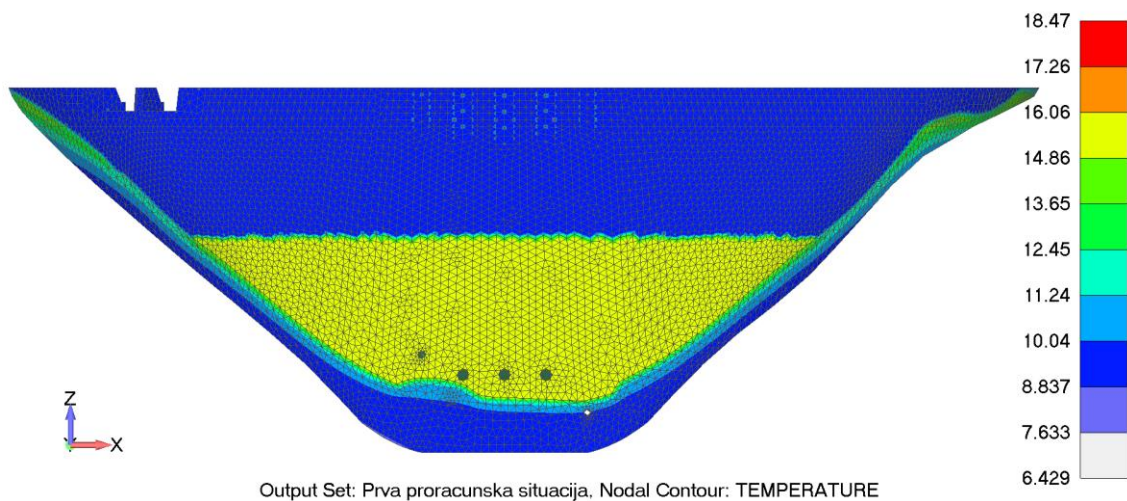
$$\begin{aligned} T^{k+1} &= F(\mathbf{u}^k, T^k) \\ F_V^{k+1} &= H(\mathbf{u}^k, F_V^k) \\ \mathbf{u}^{k+1} &= G(\mathbf{u}^k, T^{k+1}, F_V^{k+1}) \end{aligned} \quad (12)$$

где је k бројач глобалних итерација.

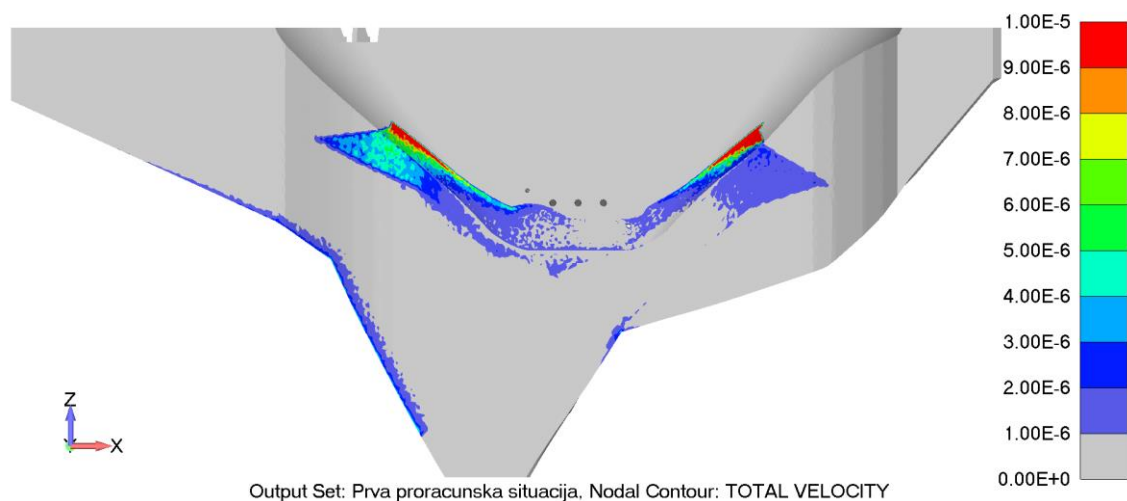
Размена информација између модула је омогућена путем интерфејс библиотеке CTL (Component Template Library) [9] развијене на Institute of Scientific Computing, Technische Universität Braunschweig или применом записа у текстуални фајл.

Пример 1.

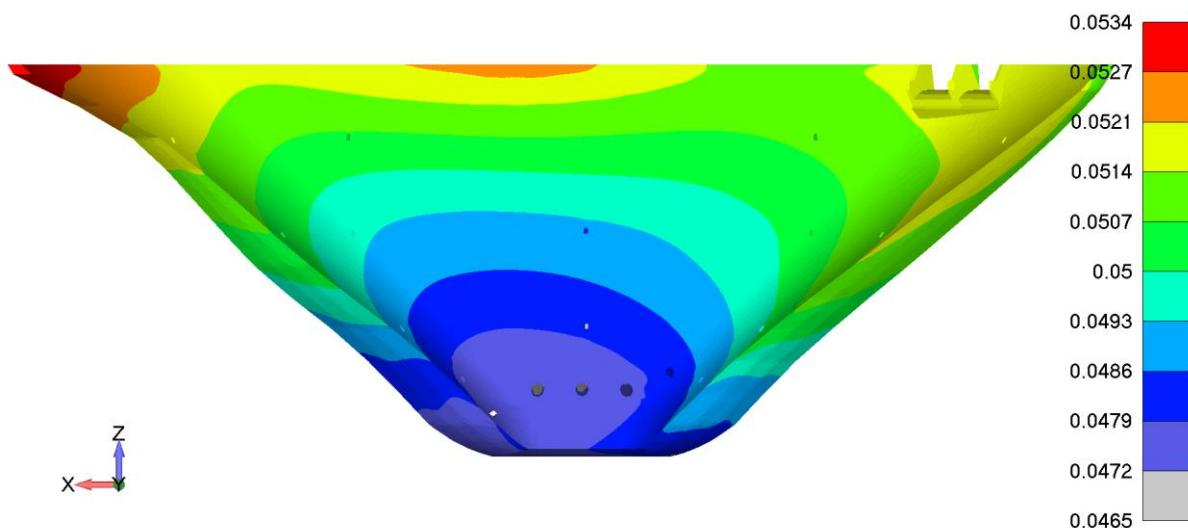
Развијено ново техничко решење (софтвер за решавање спрегнутих проблема ПАК-Мултифизикс) примењено је на међународном нивоу за термичко-филтрационо-структурни прорачун лучне бране Гранчарево у Републици Српској, БиХ [10, 11]. Израђен је детаљан тродимензионални модел, са припадајућом стенском масом, применом тетраедарских коначних елемената са међучворовима. Сprovedена је калибрација термичких процеса на бетонској брани, калибрација филтрационих процеса у брани и стенској маси, као и калибрација напонско-деформационих процеса. При спровођењу структурне анализе и калибрацији напонско-деформационих процеса, коришћени су контурни услови добијени на основу анализе термичких и филтрационих процеса, односно вршена је спрегнута анализа коришћењем сва три солвера. На сликама 3-6 приказани су резултати термичких, филтрационих и напонско-деформационих прорачуна.



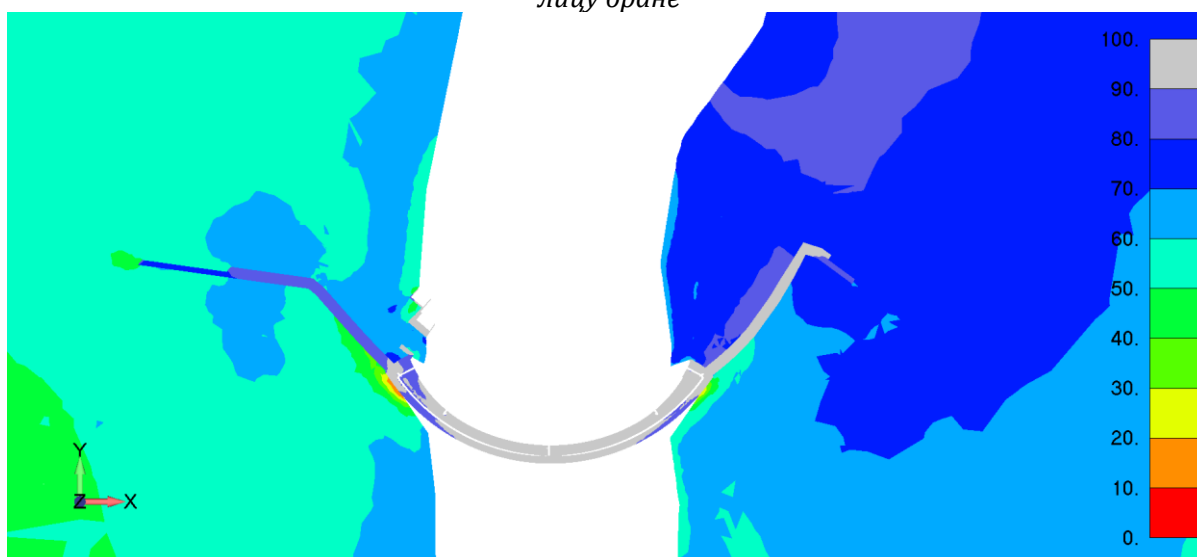
Слика 3 Резултати термичког прорачуна – поље температура на низводном лицу бране



Слика 4 Резултати филтрационог прорачуна – Поље брзина на узводном лицу бране



Слика 5 Резултати напонско-деформационог прорачуна – Поље померања на низводном лицу бране



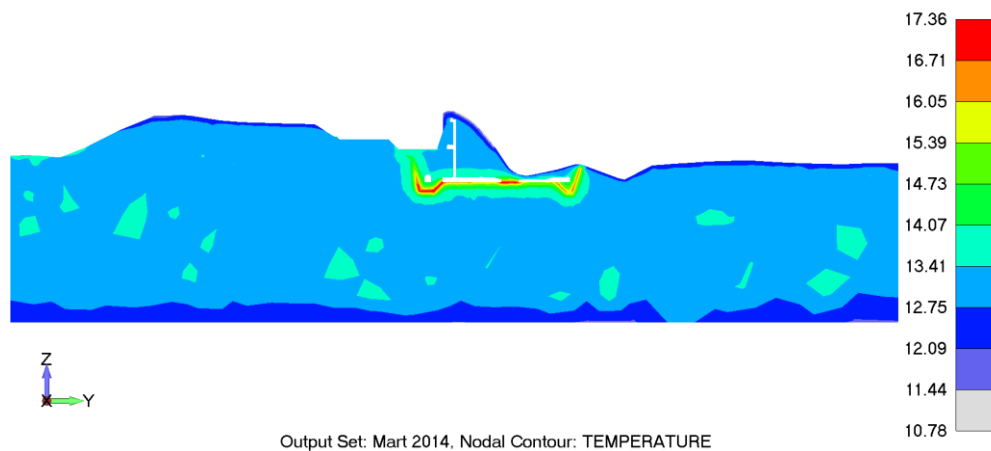
Слика 6 Резултати напонско-деформационог прорачуна – Удаљење од услова лома (%) на коти 350 тнм

У оквиру овог пројекта израђена је корисничка документација са детаљним упутством за употребу развијеног софтвера у области рачунске механике солида, провођења топлоте и филтрационих процеса. Пре саме примене софтвера на реалној конструкцији спроведена је валидација и верификација кроз више примера поређењем нумеричких решења са експерименталним, теоријским и решењима добијеним применом комерцијалних софтвера. Корисничка упутства детаљно описују структуру улазних фајлова, на основу којих корисник може да врши измене у улазним подацима, као и детаљан опис структуре улазно-излазних фајлова.

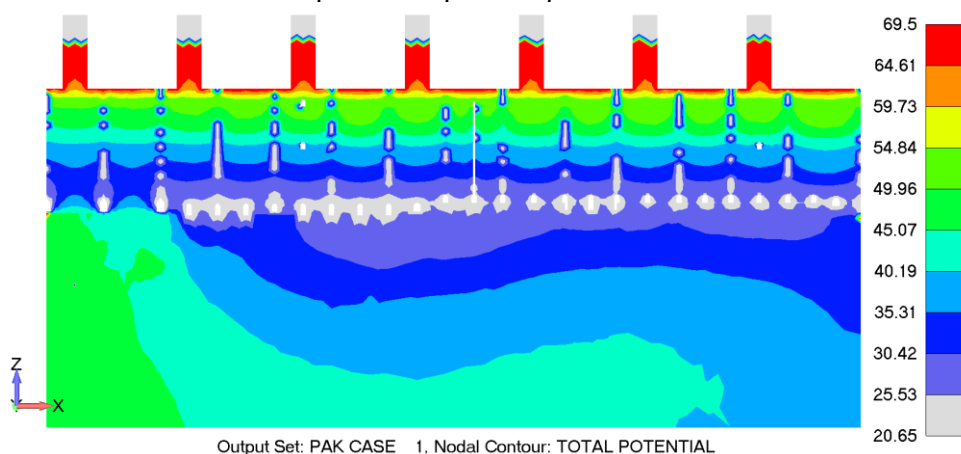
Пример 2.

Развијено ново техничко решење (софтвер за решавање спрегнутих проблема ПАК-Мултифизикс) примењено је за термичко-филтрационо-структурни прорачун хидроелектране ХЕ Бердап 1 [12]. Анализа преливне бране и електране је спроведена применом материјалног модела бетона заснованог на теорији пластичности са оштећењима за симулацију механичког понашања стенске масе и бетона. Естимација материјалних параметара модела стенске масе је спроведена применом постојећих

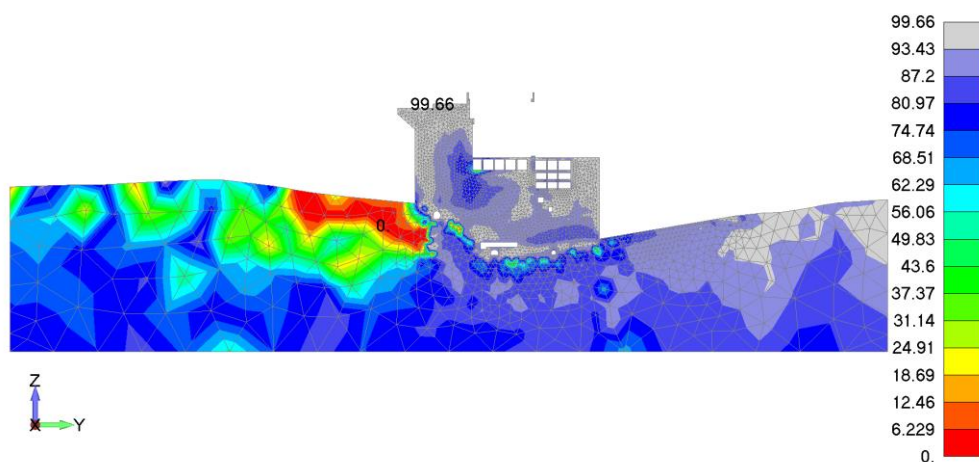
експерименталних резултата испитивања узорака стене на локацији преградне конструкције. Поред механичких оптерећења при напонско-деформационој анализи узети су у обзир претходно одређено поље температура и филтрационе силе. На сликама 7-9 приказани су резултати термичких, филтрационих и напонско-деформационих прорачуна.



Слика 7 Резултати термичког прорачуна - Поље температуре - Попречни пресек - преливна брана Ђердап 1



Слика 8 Резултати филтрационог прорачуна - Поље потенцијала - преливна брана Ђердап 1



Слика 9 Резултати напонско-деформационог прорачуна - Удаљење од површи течења (%) - хидроелектрана Ђердап 1

5. Литература

1. Dunić Vladimir, Busarac Nenad, Slavković Vukašin, Rosić Bojana, Niekamp Rainer, Matthies Hermann, Slavković Radovan, Živković Miroslav, A thermo-mechanically coupled finite strain model considering inelastic heat generation, *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, Vol.28, pp. 993-1007, ISSN 0935-1175, Doi <http://dx.doi.org/10.1007/s00161-015-0442-5>, 2016.
2. Којић М., Славковић Р., Живковић М., Грујовић Н., Метод коначних елемената I, Машински факултет, Крагујевац, 2010.
3. Živković M., Vulović S., Kojić M., Slavković R., Grujović N., PAK-T - Program for FE Heat Transfer Analysis of Solids and Structures, Faculty of Engineering, University of Kragujevac, Serbia, 2019.
4. Živković M., Vulović S., Kojić M., Slavković R., Grujović N., User manual and examples for PAK-T – Program for FE Heat Transfer Analysis of Solids and Structures, Faculty of Engineering, University of Kragujevac, Serbia, 2019.
5. Živković M., Vulović S., Kojić M., Slavković R., Grujović N., PAK-P - Program for FE Analysis of Flow Through Porous Media, Faculty of Engineering, University of Kragujevac, Serbia, 2019.
6. Živković M., Vulović S., Kojić M., Slavković R., Grujović N., User manual and examples for PAK-P – Program for FE Analysis of Flow Through Porous Media, Faculty of Engineering, University of Kragujevac, Serbia, 2019.
7. Živković M., Kojić M., Slavković R., Grujović N., Rakić D., Dunić V., PAK-S - Program for FE Structural Analysis of Solids and Structures, Faculty of Engineering, University of Kragujevac, Serbia, 2019.
8. Živković, M., Kojić, M., Slavković, R., Grujović, N., Rakić D., Dunić V., User manual and examples for PAK-S – Program for FE Structural Analysis of Solids and Structures, Faculty of Engineering, University of Kragujevac, Serbia, 2019.
9. Niekamp, R.: CTL Manual for Linux/Unix for the Usage with C++. Institut für Wissenschaftliches Rechnen—TU Braunschweig, Germany, 2005.
10. Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Брана „Гранчарево“ – Систем за управљање безбедношћу – Извештај о теоријским основама, алгоритмима и нумеричким солверима МКЕ модела термичких, филтрационих и напонско-деформационих процеса, Београд, 2018.
11. Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Брана „Гранчарево“ – Систем за управљање безбедношћу бране – Извештај о анализама применом МКЕ модела термичких, филтрационих и напонско-деформационих процеса, Београд, 2019.
12. Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, ХЕ „Ђердап 1“ – Систем за управљање безбедношћу бране – Извештај о МКЕ моделу термичких, филтрациони и напонско-деформационих процеса на преливној брани и електрани, Београд, 2018.

Прилог

уз пријаву Техничког решења категорије M81,
под називом „Софтвер за решавање спрегнутих проблема ПАК-Мултифизикс“,
чији су аутори: др Мирослав Живковић, ред. проф.; др Снежана Вуловић, научни сарадник; др Драган Ракић, доцент; др Владимир Дунић, доцент; др Ненад Грујовић, ред. проф.

Листа раније прихваћених техничких решења

- Аутор др Мирослав Живковић, ред. проф. има следећа раније прихваћена техничка решења:
 - Категорија M83 (Ново лабораторијско постројење – ново експериментално постројење)
 1. Александар Дишић, Владимир Миловановић, Драган Ракић, Милан Благојевић, **Мирослав Живковић**, Радован Славковић, Родољуб Вујанац, Uređaj za ispitivanje materijala pri velikim brzinama deformacije - Zatezni Norkinsonov štап, 2012, Расположиво на сајту Министарства просвете, науке и технолошког развоја:
<http://www.mpn.gov.rs/wp-content/uploads/2016/04/TEHNICKA-RESENJA-2011-2015-10-april.xls> - редни број техничког решења 531
 - Категорија M85 (Прототип, нова метода, софтвер, стандардизован или атестиран инструмент, нова генска проба, микроорганизми (уз доказ)):
 2. **Мирослав Живковић**, Снежана Вуловић, Гордана Јовичић, Никола Миљивојевић, Бобан Стојановић, „Софтвер за замор“ – ПАК–ФАТ, Наручилац: Министарство за науку Републике Србије, ЈП Електропривреда Србије, Корисник: ЈП Електропривреда Србије, 2005 – 2007.
http://www.fink.rs/images/Fakultet/NIR/tehnicka_resenja/tr21.pdf
 3. **Мирослав Живковић**, Гордана Јовичић, Милош Којић, Радован Славковић, Ненад Грујовић, Снежана Вуловић, „Софтвер за рачунску механику лома“ – ПАК–ФМ, Наручилац: Министарство за науку Републике Србије, ЈП Електропривреда Србије, Корисник: ЈП Електропривреда Србије, 2005 – 2007.
http://www.fink.rs/images/Fakultet/NIR/tehnicka_resenja/tr22.pdf
 4. Милош Којић, Ненад Филиовић, **Мирослав Живковић**, Радован Славковић, Ненад Грујовић, Софтвер за ламинарно струјање флуида и пренос топлоте, Наручилац: Министарство за науку Републике Србије, Корисник: Институту за водопривреду „Јарослав Черни“, Клинички центар Крагујевац, 2005 – 2007.
http://www.fink.rs/images/Fakultet/NIR/tehnicka_resenja/tr43.pdf
 5. Родољуб Вујанац, Радован Славковић, **Мирослав Живковић**, Ненад Марјановић, Снежана Вуловић, Владимир Миловановић, „Нова метода за пројектовање и прорачун складишних система“, Наручилац: Министарство

за науку Републике Србије, Корисник: Министарство за науку Републике Србије, Приватно предузеће „ИЦ“ Инжењеринг д.о.о., Приватно предузеће „Милановић Инжењеринг“ д.о.о., ДП Застава Машине, 2005 – 2007.

http://www.fink.rs/images/Fakultet/NIR/tehnicka_resenja/tr53.pdf

6. Милош Којић, Радован Славковић, **Мирослав Живковић**, Ненад Грујовић, Драган Ракић, Софтвер за геомеханику - ПАК-ГЕО, Наручилац техничког решења: Министарство за науку Републике Србије и Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Корисник техничког решења: Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Година када је техничко решење урађено: 2008-2010.

http://www.fink.rs/images/Fakultet/NIR/tehnicka_resenja/TR58.pdf

7. **Мирослав Живковић**, Милан Благојевић, Гроан Станковић, Александар Николић, Нилорад Живковић, Softver за brzo generisanje modela konačnih elemenata krvnih sudova - STL2FEM, 2012, Расположиво на сајту Министарства просвете, науке и технолошког развоја: <http://www.mpn.gov.rs/wp-content/uploads/2016/04/ТЕННИСКА-RESENJA-2011-2015-10-april.xls> - редни број техничког решења 720.

http://www.fink.rs/images/Fakultet/NIR/tehnicka_resenja/TR-71-2012.pdf

8. **Мирослав Живковић**, Радован Славковић, Милан Благојевић, Марко Топаловић, Ненад Бусарац, Јелена Борота, Softver за numeričko rešavanje elektrostatičkih problema - ПАК-Е, 2012, Расположиво на сајту Министарства просвете, науке и технолошког развоја: <http://www.mpn.gov.rs/wp-content/uploads/2016/04/ТЕННИСКА-RESENJA-2011-2015-10-april.xls> - редни број техничког решења 723.

http://www.fink.rs/images/Fakultet/NIR/tehnicka_resenja/TR-69-2012.pdf

9. **Мирослав Живковић**, Милан Благојевић, Александар Дишић, Радован Славковић, Softver за određivanje deformacija na osnovu fotogrametrijskih merenja - СММ2Deformation, 2012, Расположиво на сајту Министарства просвете, науке и технолошког развоја: <http://www.mpn.gov.rs/wp-content/uploads/2016/04/ТЕННИСКА-RESENJA-2011-2015-10-april.xls> - редни број техничког решења 724.

http://www.fink.rs/images/Fakultet/NIR/tehnicka_resenja/TR-72-2012.pdf

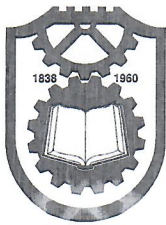
10. **Мирослав Живковић**, Радован Славковић, Миош Којић, Ненад Грујовић, Снежана Вуловић, Ненад Бусарац, Марко Топаловић, Softver за progачun temperaturnog polja konstrukcija- ПАК-Т, 2012, Расположиво на сајту Министарства просвете, науке и технолошког развоја: <http://www.mpn.gov.rs/wp-content/uploads/2016/04/ТЕННИСКА-RESENJA-2011-2015-10-april.xls> - редни број техничког решења 727.

http://www.fink.rs/images/Fakultet/NIR/tehnicka_resenja/TR-68-2012.pdf

- Аутор др Снежана Вуловић, научни сарадник има следећа раније прихваћена техничка решења:
 - Категорија М85 (Прототип, нова метода, софтвер, стандардизован или атестиран инструмент, нова генска проба, микроорганизми (уз доказ)):

1. Мирослав Живковић, **Снежана Вуловић**, Гордана Јовичић, Никола Миливојевић, Бобан Стојановић, „Софтвер за замор“ – ПАК–ФАТ, Наручилац: Министарство за науку Републике Србије, ЈП Електропривреда Србије, Корисник: ЈП Електропривреда Србије, 2005 – 2007.
http://www.fink.rs/images/Fakultet/NIR/tehnicka_resenja/tr21.pdf
 2. Мирослав Живковић, Гордана Јовичић, Милош Којић, Радован Славковић, Ненад Грујовић, **Снежана Вуловић**, „Софтвер за рачунску механику лома“ – ПАК–ФМ, Наручилац: Министарство за науку Републике Србије, ЈП Електропривреда Србије, Корисник: ЈП Електропривреда Србије, 2005 – 2007.
http://www.fink.rs/images/Fakultet/NIR/tehnicka_resenja/tr22.pdf
 3. Родољуб Вујанац, Радован Славковић, Мирослав Живковић, Ненад Марјановић, **Снежана Вуловић**, Владимир Миловановић, „Нова метода за пројектовање и прорачун складишних система“, Наручилац: Министарство за науку Републике Србије, Корисник: Министарство за науку Републике Србије, Приватно предузеће „ИЦ“ Инжењеринг д.о.о., Приватно предузеће „Милановић Инжењеринг“ д.о.о., ДП Застава Машине, 2005 – 2007.
http://www.fink.rs/images/Fakultet/NIR/tehnicka_resenja/tr53.pdf
 4. Мирослав Живковић, Радован Славковић, Миош Којић, Ненад Грујовић, **Снежана Вуловић**, Ненад Бусарац, Марко Топаловић, Softver za proračun temperaturnog polja konstrukcija- ПАК-Т, 2012, Расположиво на сајту Министарства просвете, науке и технолошког развоја: <http://www.mpn.gov.rs/wp-content/uploads/2016/04/TEHNICKA-RESENJA-2011-2015-10-april.xls> - редни број техничког решења 727
http://www.fink.rs/images/Fakultet/NIR/tehnicka_resenja/TR-68-2012.pdf
- Аутор др Драган Ракић, доцент има следећа раније прихваћена техничка решења:
 - Категорија М83 (Ново лабораторијско постројење – ново експериментално постројење)
 1. Александар Дишић, Владимир Миловановић, **Драган Ракић**, Милан Благојевић, Мирослав Живковић, Радован Славковић, Родољуб Вујанац, Uređaj za ispitivanje materijala pri velikim brzinama deformacije - Zatezni Norkinsonov štап, 2012, Расположиво на сајту Министарства просвете, науке и технолошког развоја:
<http://www.mpn.gov.rs/wp-content/uploads/2016/04/TEHNICKA-RESENJA-2011-2015-10-april.xls> - редни број техничког решења 531
 - Категорија М85 (Прототип, нова метода, софтвер, стандардизован или атестиран инструмент, нова генска проба, микроорганизми (уз доказ)):
 2. Милош Којић, Радован Славковић, Мирослав Живковић, Ненад Грујовић, **Драган Ракић**, Софтвер за геомеханику - ПАК-ГЕО, Наручилац техничког решења: Министарство за науку Републике Србије и Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Корисник техничког решења: Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Година када је техничко решење урађено: 2008-2010.
http://www.fink.rs/images/Fakultet/NIR/tehnicka_resenja/TR58.pdf

- Аутор др Ненад Грујовић, ред. проф. има следећа раније прихваћена техничка решења:
 - Категорија М85 (Прототип, нова метода, софтвер, стандардизован или атестиран инструмент, нова генска проба, микроорганизми (уз доказ)):
 1. Мирослав Живковић, Гордана Јовичић, Милош Којић, Радован Славковић, **Ненад Грујовић**, Снежана Вуловић, „Софтвер за рачунску механику лома“ – ПАК–ФМ, Наручилац: Министарство за науку Републике Србије, ЈП Електропривреда Србије, Корисник: ЈП Електропривреда Србије, 2005 – 2007. http://www.fink.rs/images/Fakultet/NIR/tehnicka_resenja/tr22.pdf
 2. Милош Којић, Ненад Филиовић, Мирослав Живковић, Радован Славковић, **Ненад Грујовић**, Софтвер за ламинарно струјање флуида и пренос топлоте, Наручилац: Министарство за науку Републике Србије, Корисник: Институту за водопривреду „Јарослав Черни“, Клинички центар Крагујевац, 2005 – 2007. http://www.fink.rs/images/Fakultet/NIR/tehnicka_resenja/tr43.pdf
 3. Милош Којић, Радован Славковић, Мирослав Живковић, **Ненад Грујовић**, Драган Ракић, Софтвер за геомеханику - ПАК-ГЕО, Наручилац техничког решења: Министарство за науку Републике Србије и Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Корисник техничког решења: Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Година када је техничко решење урађено: 2008-2010. http://www.fink.rs/images/Fakultet/NIR/tehnicka_resenja/TR58.pdf
 4. Мирослав Живковић, Радован Славковић, Милош Којић, **Ненад Грујовић**, Снежана Вуловић, Ненад Бусарац, Марко Топаловић, Softver za proračun temperaturnog polja konstrukcija- ПАК-Т, 2012, Расположиво на сајту Министарства просвете, науке и технолошког развоја: <http://www.mpn.gov.rs/wp-content/uploads/2016/04/TEHNICKA-RESENJA-2011-2015-10-april.xls> - редни број техничког решења 727. http://www.fink.rs/images/Fakultet/NIR/tehnicka_resenja/TR-68-2012.pdf



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
Факултет инжењерских наука
Број: 01-1/1019-14
19.03.2020. године
Крагујевац

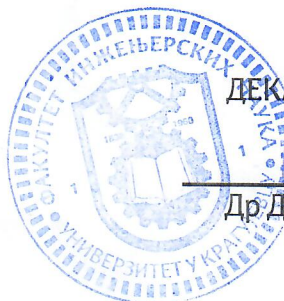
На предлог др Мирослава Живковића број 01-1/1073 од 18.03.2020. године а на основу Правилника о поступку, начину вредновања и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача ("Сл. гласник РС", бр. 24/2016 и 21/2017) и члана 173 Статута Факултета инжењерских наука у Крагујевцу (број 01-1/2262 од 02.07.2018. године), Наставно-научно веће Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, на седници одржаној 19.03.2020. године, донело је

ОДЛУКУ

- I Усваја се пријава техничког решења под насловом: **„Софтвер за решавање спрегнутих проблема ПАК - Мултифизикс“**, чију су аутори: др Мирослав Живковић, др Снежана Вуловић, др Драган Ракић, др Владимир Дунић и др Ненад Грујовић.
- II Техничко решење се упућује Матичном одбору за електронику, телекомуникације и информационе технологије.

Одлуку доставити:

- Матичном одбору Министарства
- Ауторима
- Архиви



ДЕКАН ФАКУЛТЕТА ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА


Др Добрица Миловановић, редовни професор

**Министарство просвете, науке и технолошког развоја
Матични научни одбор за електронику, телекомуникације
и информационе технологије
ТР092/29.05.2020**

Београд, 29. Мај 2020. год.

**Факултет инжењерских наука
Универзитет у Крагујевцу**

Поштовани,

На основу захтева за верификацију техничког решења под насловом **„Софтвер за решавање спрегнутих проблема ПАК-Мултифизикс“**, чији су аутори Мирослав Живковић, Снежана Вуловић, Драган Ракић, Владимир Дунић и Ненад Грујовић, чланови Матичног научног одбора за електронику, телекомуникације и информационе технологије су на својој седници одржаној 29. маја 2020. године, разматрали исти и донели одлуку да су у складу са условима које предвиђа *Правилник о поступку и начину вредновања и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача* („Службени гласник РС“, број 24/2016, 21/2017 и 38/2017):

„ИСПУЊЕНИ СВИ ПРОПИСАНИ УСЛОВИ ЗА ДОДЕЛУ КАТЕГОРИЈЕ

М81 „Ново техничко решење (метода) примењено на међународном нивоу“.

С поштовањем,



др Дана Васиљевић-Радовић

председник Матичног научног одбора за
електронику, телекомуникације и
информационе технологије