

**Зоран Марковић^{1*}, Слободан Сџуџар², Мирко Динуловић²,
Предраг Сџефановић¹, Дејан Цветиновић¹**

¹ Лабораторија за термотехнику и енергетику,
Институт за нуклеарне науке „Винча”, Универзитет у Београду, Београд, Србија

² Катедра за ваздухопловство, Машински факултет,
Универзитет у Београду, Београд, Србија

Фази експертски систем за прорачун параметара спрегнуте нумеричке анализе интеракције флуида и танкозидне структуре

Научни рад

У раду су приказани резултати нумеричких прорачуна интеракције флуид-структура коришћењем дискретизационих нумеричких метода – методе коначних елемената за прорачун напонско-деформационог стања зида канала и методе коначних зајремина за нумерички прорачун динамике флуида. На основу добијених резултата развијен је фази експертски систем за процену излазних параметара нумеричког прорачуна, приказане су основне карактеристике развијеног фази модела и резултати добијени његовом применом. Анализирани су утицаји три улазна параметра – параметра унутрашње површине зида канала, разлике између параметра унутрашње и спољашње површине зида и фактора који дефинише густину нумеричких мрежа – на два излазна параметра: вредности пада стањичког притиска низ струју и вредности максималних комбинованих Фон Мисесових напона остварених у структури канала за задате услове оптерећења. На основу добијених резултата видимо да формирани фази експертски систем може са задовољавајућом тачношћу бити искоришћен за процену посматраних излазних величина, при знатно краћем времену потребном за прорачун и уз ангажовање ресурса рачунарскег система у значајно мањем обиму.

*Кључне речи: танкозидне плоче, интеракција структура-флуид,
фази експертски систем*

Увод

Постоји широк спектар инжењерских проблема где су померања и деформације флексибилне структуре условљени струјањем флуида који протиче кроз или облива структуру и обратно. Они спадају у групу проблема интеракције структуре и флуида (Fluid Structure Interaction – FSI). У највећем броју случајева није могуће доћи до аналитичког решења FSI проблема, док су одговарајући

* Одговорни аутор; електронска адреса: zoda_mark@vinca.rs

експериментални резултати веома ограничени и за које се увек поставља питање њихове примењивости. Стога се у истраживању комплексних FSI проблема често користе нумеричке методе. Комплексна нумеричка анализа интеракције флуида и структуре се заснива на спрезању рачунарске симулације струјања флуида (Computer Fluid Dynamics – CFD), обично засноване на методи коначних запремина, са рачунарском структуралном анализом која се најчешће спроводи коришћењем методе коначних елемената (Finite Elements Method – FEM).

Мноштво проблема из најразличитијих инжењерских области се може сврстати у класу FSI проблема и налазимо их првенствено у области конструисања ваздухоплова (утицај еластичности крила на његове аеродинамичке перформансе) [1], али и у медицини (извијање и колапс плућне артерије) [2], енергетици (утицај термичких деформација канала аеросмеше на протицање аеросмеше кроз канал) [3] и сл. За решавање комплексног проблема динамичког понашања танкозидне еластичне структуре напуњене са, или уроњене у нестишљиви флуид, са успехом су коришћени комерцијални софтверски пакети [4]. У наведеним примерима се CFD и структурални нумерички прорачуни одвијају засебно, при чему се итеративна размена података одвија у тачно дефинисаним фазама прорачуна. Да би се задовољили општи услови конвергенције спрегнуте симулације, у оквиру једног временског корака се извршавају вишеструке итерације између ових прорачуна уз остваривање конвергенције сваког од њих појединачно. Временски зависно спрезање CFD и прорачуна деформације танкозидне структуре љуски са великим померањима примењено је у раду [5]. Два различита нумеричка прорачуна, један за симулацију струјања флуида, а други за структуралну анализу, одвијају се истовремено, а у оквиру сваке итерације спрегнутог прорачуна интеракције флуид – структура међусобно се размењују информације о притисним оптерећењима флуида и померањима структуре.

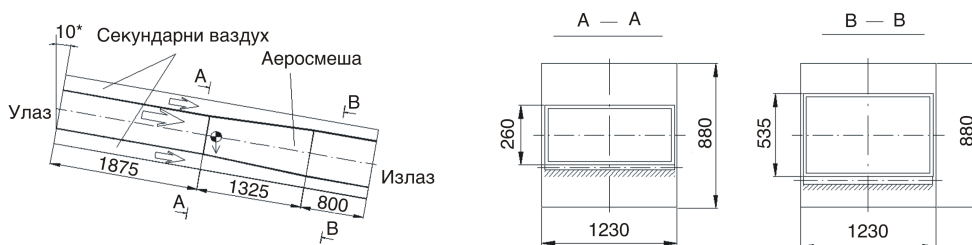
За успешно нумеричко решавање FSI проблема потребно је да коришћени рачунарски систем поседује потребне ресурсе, при чему се неретко дешава да дуготрајни прорачун колапсира без постизања конвергентног решења. При решавању FSI проблема као резултат се добија велика количина података, која је комплексна за обраду и манипулацију. Са друге стране, често се решење практичних инжењерских проблема своди на добијање ограниченог сета специфичних података, па је оправдано применити рачунске технике које омогућавају добијање квалитетних и поузданих информација, без обзира што се базирају на ограниченом сету нумеричких FSI резултата. У ту сврху могу бити коришћени нумерички модели фази логике као специфичне форме теорије скупова у којој искази могу имати степен применљивости уместо да су једнозначно дефинисани као истинити или лажни. Такаги и Сугено [6] су формирали и описали математички алат потребан за израду фази модела неког система. У општем случају, коначно решење нумеричког прорачуна методом коначних елемената зависи од избора различитих улазних параметара као што су тип коришћених коначних елемената, величина елемената, топологија мреже, нумерација чворова итд. Користећи чињеницу да постоји доста неодређености у једној структуралној нумеричкој анализи заснованој на методи коначних елемената, формиран је фази експертски систем за предвиђање неких резултата нумеричког прорачуна проблема притиснутог гуменог цилиндра [7]. Оптимизација модела фази експертског система може се постићи коришћењем генетског алгорита. Показано је да тако оптимизован фази експертски систем може

бити успешно искоришћен за предвиђање коефицијената узгона и отпора модела авиона тестираног у аеротунелу подзвучних брзина [8].

Предмет овог рада је одређивање карактеристика струјног поља ваздуха који протиче кроз затворени правоугаони канал аеросмеше и напонско-деформационог стања у структури термички оптерећеног танкозидног канала кроз који та струја ваздуха протиче. Посматрани канал је кутијаста танкозидна структура састављена од заварених челичних плоча дебљине зида $t = 10 \text{ mm}$, са чије спољашње стране се налазе слојеви стаклене вуне, опшивене алуминијумском оплатом. Основне геометријске карактеристике канала су приказане на сл. 1. Температура аеросмеше на улазу у канал се креће од $170 \text{ }^\circ\text{C}$ до $220 \text{ }^\circ\text{C}$. Студија у којој је анализиран утицај процеса гасификације аеросмеше луком нискотемпературске плазме на термичко оптерећење канала [9], предвидела је температуру унутрашње површине зида канала од $720 \text{ }^\circ\text{C}$, а спољашње $709 \text{ }^\circ\text{C}$. Поред дејства струјног поља, гравитације и услова ослањања, деформисање плоча зидова канала у највећој мери изазива термичко оптерећење које зависи од радног режима плазматрона, радног режима горионика и дебљине и стања изолације.

Нумеричко моделирање интеракције флуидног тока и еластичне структуре канала кроз који струји флуид са двосмерним преносом топлоте је веома комплексан проблем. У циљу поједностављења, у овом раду није моделиран феномен преношења топлоте, већ је термичко оптерећење структуре канала представљено преко униформних температурних поља на унутрашњој и спољашњој површини зида канала. Услед разлика у овим температурама долази до термичке дилатације у правцу нормале на средњу површ плоче зида канала. Уведена претпоставка је веома груба апроксимација реалне ситуације. Аеросмеша се креће кроз канал брзином од $10\text{--}40 \text{ m/s}$ и задржава се у каналу од $0,1$ до $0,4$ секунде, при чему се термички оптерећене плоче зидова канала извијају у таласне облике који одговарају њиховим најнижим сопственим модовима [3].

Параметри струјног поља рачунати су коришћењем комерцијалног софтвера ANSYS CFX. Са тим нумеричким прорачуном је спрегнут прорачун одређивања напонско-деформационог стања структуре канала коришћењем комерцијалног софтвера ANSYS. Урађена је серија спрегнутих нумеричких прорачуна интеракције флуида и структуре канала за различите вредности фактора густине мреже F_{gm} , температуре унутрашње површине зида канала T_{un} и разлике температура унутрашње (T_{un}) и спољашње (T_{sp}) површине зида канала $\Delta T = T_{un} - T_{sp}$. Варирањем параметра ΔT симулиране су различите дебљине изолације. Број дискретизационих елемената у



Слика 1. Геометријске карактеристике канала аеросмеше горионика на котлу блока 1 термоелектране ТЕНТ-А; лево – поглед са стране, десно – попречни пресеци А-А и В-В

нумеричким мрежама структуралног и струјног домена дефинисан је фактором густине мреже F_{gm} тако да је остварено поклапање чворова нумеричких мрежа на површини раздвајања два физички различита нумеричка домена. Добијене вредности пада притиска низ струју (Δp) и максималних комбинованих Фон Мисесових напона (σ_{VMmax}) у структури канала употребљене су за формирање и тестирање фази експертског система (FLES). Потом су вредности Δp и σ_{VMmax} добијене коришћењем FLES система на другом сету улазних величина, упоређене са резултатима нумеричке FSI симулације.

Структурални прорачун

За дефинисање параметара нумеричке анализе, прорачун и приказ напонско-деформационог стања структуре канала коришћен је комерцијални софтвер ANSYS заснован на методи коначних елемената. Танкозидна структура канала је дискретизована правоугаоним коначним елементом љуске са шест степени слободе у сваком од 8 чворова (транслација у правцу и ротација око x -, y - и z - осе), чија је функција померања u у правцу осе x облика [10]:

$$u = \frac{1}{4}u_i(1-s)(1-t)(s+t-1) + \frac{1}{4}u_j(1-s)(1-t)(s-t-1) + \frac{1}{4}u_k(1-s)(1-t)(s-t-1) + \frac{1}{4}u_l(1-s)(1-t)(s+t-1) + \frac{1}{2}u_m(1-s^2)(1-t) + \frac{1}{2}u_n(1-s)(1-t^2) + \frac{1}{2}u_o(1-s^2)(1-t) + \frac{1}{2}u_p(1-s)(1-t^2) \quad (1)$$

У једн. (1) u_i је померање чвора i , док су s и t осе локалног координатног система елемента. Функције осталих померања и ротација су аналогне функцији (1). Претпостављено је да нормала на средњу површ љуске остаје права али не и обавезно управна на средњу раван љуске током деформације. Спроведена структурална нумеричка анализа је нелинеарна квазистатичка. Геометријска нелинеарност и нелинеарност материјала узете су у обзир применом методе поларне декомпозиције деформационог градијента [F]:

$$[F] = \frac{\partial \{x\}}{\partial \{X\}} [L] = \frac{\partial \{u\}}{\partial \{X\}} [R][U] \quad (2)$$

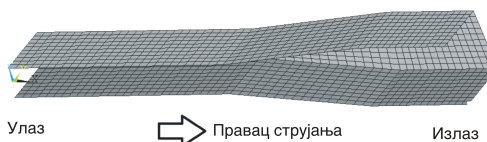
где су $[R]$ матрица ротације, $[U]$ матрица промене облика, $\{x\}$ и $\{X\}$ су вектори положаја у деформисаном и недеформисаном стању, $\{u\}$ је вектор померања а $\{L\}$ јединична матрица. Вектор логаритамских деформација је дефинисан као:

$$[\varepsilon] = \ln[U] \quad (3)$$

Спектралном декомпозицијом тензора $[U]$ добија се:

$$[\varepsilon] = \sum_{i=1}^3 \ln(\lambda_i) \{e_i\} \{e_i^T\} \quad (4)$$

где је λ_i сопствена вредност, а $\{e_i\}$ – сопствени вектор тензора $[U]$. Матрица ротација се добија декомпозицијом деформационог градијента. Матрица елемената и вектори оптерећења се добијају коришћењем Лагранжеве формулације узимајући у обзир промене у тангенцијалној матрици крутости.



Слика 2. Модел коначних елемената дискретизоване структуре канала, $F_m = 2$

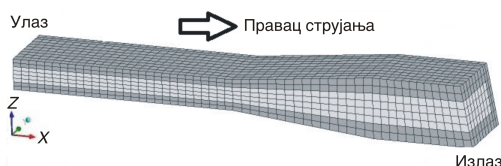
Материјал канала моделиран је на начин како је то описано у студији [3], формиран је нелинеарни модел који претпоставља да је ниво пластичности независан од нивоа оптерећења, занемарујући нелинеарну област у напонско-деформационој карактеристици. На сл. 2 је приказан модел структуре канала са укупно 1740 коначних елемената љуске, што одговара моделу са фактором мреже $F_{gm} = 2$. Услед постојања симетрије у односу на вертикалну раван која пролази кроз осу канала, коначним елементима љуске моделирана је само једна половина канала. Формирани модел коначних елемената је укрућен (спречена су померања и ротације у чворовима) у улазном, излазном и попречном пресеку на $x = 1,875$ m, док је у равни $x-z$ постављен гранични услов симетрије. За решавање сета добијених линеарних једначина коришћен је потпуни Њутн-Рапсонова метода.

Нумеричка симулација струјања флуида

Параметри струјног поља прорачунати су коришћењем комерцијалног софтвера ANSYS CFX заснованог на методи коначних запремина. Претпостављено је стационарно струјање ваздуха улазне брзине у канал од 30 m/s. Захваљујући услову симетрије моделирана је само једна половина струјног домена. Дискретизација је извршена елементима коначних запремина над којима је успостављен систем Навије-Стоксових једначина. Затварање овог система једначина остварено је коришћењем две додатне једначине SST турбулентног модела смичућих напона [11].

При спрезању структуралног и CFD прорачунског домена долази до померања њихове додирне површине услед деформисања структуре. Стога је потребно да део нумеричке мреже који се налази на површини додирова ова два домена може имати брзину кретања различиту од нуле и да су контролне запремине, којима је дискретизован CFD домен, деформабилне [12]. У случају да дође до значајног деформисања и губитка квалитета нумеричке мреже, прорачун неће конвергирати и може доћи до његовог прекида. У том случају се формира нова нумеричка мрежа са другачијом топологијом, а прорачунате вредности се интерполирају на нову нумеричку мрежу.

Резултат нумеричког прорачуна потпуно развијеног струјног поља модела недеформабилног канала продуженог узводно од улазног пресека правом деоницом од 15 ширина канала, је интерполиран као почетна вредност струјних параметара у нумеричку мрежу којом је дискретизован струјни простор деформабилног канала, са циљем убрзавања конвергенције нумеричког прорачуна интеракције флуид-структура. На сл. 3 је приказана



Слика 3. Модел коначних запремина дискретизованог струјног простора, $F_m = 2$

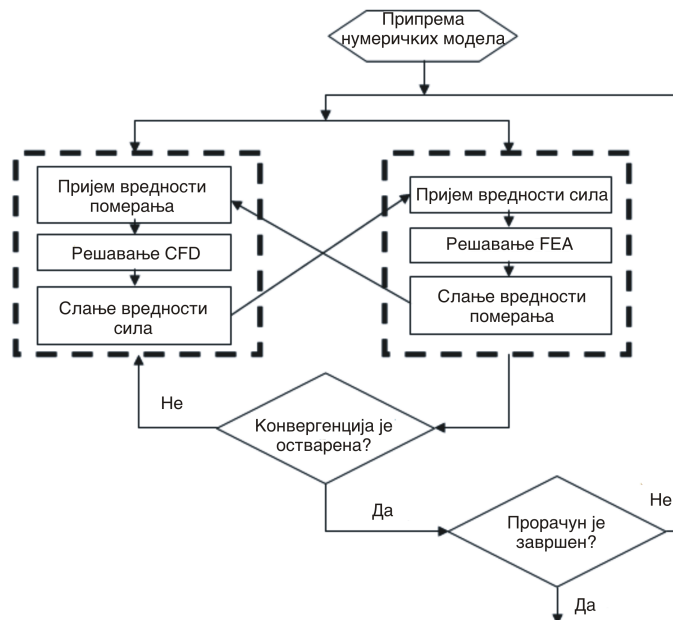
нумеричка мрежа модела струјног простора за фактор густине мреже $F_{gm} = 2$ са 4480 коначних запремина.

Спрегнута нумеричка симулација интеракције флуид-структура

Нумеричка симулација интеракције флуид-структура (FSI) је комбинација нумеричких прорачуна за две различите инжењерске области и базира се на узастопном итеративном спрезању нумеричких прорачуна којима се одвојено решавају матричне једначине моделираних физичких појава струјања флуида и напонско-деформационог стања структуре. Шематски приказ процедуре која је коришћена за спрезање ова два различита прорачуна у поступку нумеричког решавања проблема интеракције флуид-структура дат је на сл. 4.

Након избора контролних параметара, припрема нумеричких модела и спровођење самог ФСИ прорачуна је спроведено коришћењем одговарајућих потпрограма. Потпрограми за аутоматско формирање параметарских нумеричких модела и дефинисање карактеристика структуралног и FSI прорачуна написани су у програмском језику *APDL* (ANSYS Parametric Design Language), док је потпрограм за дефинисање параметара и карактеристика CFD прорачуна формиран у програмском језику *CEL* (ANSYS CFX Expression Language).

У оквиру главног APDL програмског кода за спровођење FSI прорачуна прикупљају се подаци о мрежама на додирним (граничним) површинама прорачунских домена, обавља се мапирање чворова нумеричких мрежа и остварује се



Слика 4. Шематски приказ процедуре нумеричког прорачуна интеракције флуид-структура

размена података између нумеричких прорачуна који су потребни за проверу услова конвергенције. Мапирање положаја чворова нумеричке мреже урађено је применом алгоритма претраживања у ограниченом поддомену и омогућена је размена оптерећења између модела са мрежама различитих топологија.

Размена података између прорачуна који се обављају у оквиру софтверских пакета ANSYS и ANSYS CFX обавља се у претходно дефинисаним тачкама синхронизације. Притисно оптерећење флуида се преноси на структуру уз задржавање профила оптерећења. У оквиру сваког итеративног корака FSI прорачуна се независно одвијају прорачуни струјања флуида и напонско-деформационог стања структуре. Када се испуне унапред постављени услови конвергенције сваког од прорачуна приступа се формирању базе података које садрже вредности тренутних резултата. Између формираних база резултата обавља се размена података о тренутним вредностима оптерећења добијених у сваком од прорачунских процеса и проверавају глобални услови конвергенције FSI прорачуна. У случају да нису испуњени услови конвергенције, започиње се са новим циклусом итеративних прорачуна.

Нумерички модели су формиран у односу на глобални картезијански координатни систем, са координатним почетком смештеним у средиште улазног пресека. Координатна оса x усмерена је ка средишту излазног пресека а z -оса се налази у вертикалној равни и заклапа угао од 170°C са правцем дејства гравитације.

Урађена су укупно 52 параметарска нумеричка прорачуна интеракције флуид – структура. Температура унутрашње површине канала T_{un} је варирана у опсегу $300\text{--}900^\circ\text{C}$, разлика температура ΔT унутрашњег (T_{un}) и спољашњег (T_{sp}) зида канала је узимала вредности у опсегу $0\text{--}600^\circ\text{C}$ а фактор густине мреже F_{gm} је мењан у опсегу од 1 до 3. Конкретне вредности улазних параметара за сваку од спроведених нумеричких анализа дате су у табл. 1.

Карактеристике фази модела

Крајњи резултат једног FSI прорачуна зависи од избора разних улазних параметара [13], као што су тип и димензија дискретизационог елемента, топологија нумеричке мреже, нумерација чворова мреже итд. Један FSI прорачун карактеришу значајне неодређености које се одражавају на резултате FSI анализе. У овом раду су описане карактеристике експертског система базираног на фази логици (FLES), који је развијен са циљем да се предвиде резултати интеракције флуид-структура описаног проблема канала аеросмеше.

У општем случају, процес формирања једног FLES се састоји од неколико корака. Прво се улазном сету података додељују одговарајуће фази вредности које формирају улазни сет фази података. На основу претходно изабраних нормализованих функција и дефинисаних правила трансформације, од улазног сета се формира излазни сет фази података. Скупови фази података добијени применом постављених правила се затим претварају у бројчане вредности [14].

За формирање фази модела у овом раду су коришћене функције трансформације троугаоног облика (5) које зависе од три скаларна параметра a , b и c , како је то дефинисано на сл. 5. Вредности скаларних параметара за све три улазне и обе излазне променљиве одређене су на основу резултата 52 параметарске симулације интеракције флуид-структура и дате су у табл. 2.

Таблица 1. Вредности улазних параметара T_{un} , ΔT и F_{gm} нумеричких модела и вредности Δp и σ_{VMmax} добијене нумеричким прорачуном интеракције флуид-структура

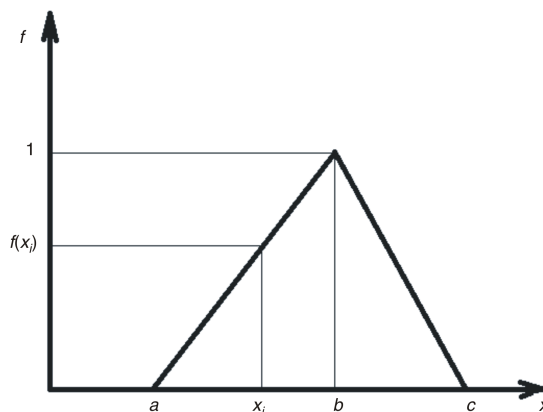
Ред. бр.	T_{un} [°C]	ΔT [°C]	F_{gm} [-]	Δp [Pa]	σ_{VMmax} [10^8 Pa]	Ред. бр.	T_{un} [°C]	dT [°C]	F_{gm} [-]	Δp [Pa]	σ_{VMmax} [10^8 Pa]
1.	300	0	1,0	-281	2,61	27.	700	100	2,0	-222	2,95
2.	300	50	1,0	-308	2,62	28.	700	300	2,0	-222	3,10
3.	300	100	1,0	-301	2,57	29.	700	500	2,0	-277	2,58
4.	300	0	2,0	-257	2,99	30.	700	0	3,0	-226	3,01
5.	300	20	2,0	-298	2,99	31.	700	10	3,0	-225	2,91
6.	300	100	2,0	-301	2,86	32.	700	50	3,0	-231	3,20
7.	300	200	2,0	-295	2,56	33.	700	100	3,0	-242	3,30
8.	300	0	3,0	-277	3,18	34.	700	200	3,0	-248	3,35
9.	300	100	3,0	-300	3,01	35.	700	300	3,0	-194	3,38
10.	500	0	1,0	-266	2,64	36.	363	142	1,7	-243	2,87
11.	500	50	1,0	-183	2,63	37.	426	75	1,2	-274	2,77
12.	500	100	1,0	-266	2,66	38.	555	238	2,1	-233	3,13
13.	500	200	1,0	-260	2,62	39.	642	417	1,5	-56	2,67
14.	500	300	1,0	-251	2,66	40.	500	20	2,0	-242	3,09
15.	500	0	2,0	-235	3,05	41.	700	627	1,4	-233	2,62
16.	500	20	2,0	-268	3,09	42.	300	50	2,0	-255	2,96
17.	500	50	2,0	-242	3,13	43.	300	200	1,0	-269	2,43
18.	500	100	2,0	-239	3,18	44.	700	50	1,0	-248	2,66
19.	500	200	2,0	-236	3,06	45.	700	200	1,0	-245	2,53
20.	500	300	2,0	-264	2,81	46.	327	285	1,2	-268	2,45
21.	500	300	3,0	-177	2,91	47.	473	392	1,2	-252	2,49
22.	700	0	1,0	-134	2,04	48.	568	446	1,4	-242	2,52
23.	700	300	1,0	-255	2,58	49.	671	525	1,4	-229	2,55
24.	700	500	1,0	-229	2,46	50.	436	175	1,3	-270	2,76
25.	700	0	2,0	-113	2,60	51.	517	108	2,0	-241	3,18
26.	700	20	2,0	-127	2,68	52.	348	294	3,0	-181	2,56

$$f(x_i) = \max \min \frac{x_i}{b} - \frac{a}{c}, \frac{c}{a} - \frac{x_i}{b}, 0 \quad (5)$$

Све нумеричке вредности улазних и излазних променљивих замењене су лингвистичким, при чему је за сваку од пет моделираних променљивих дефинисан посебан сет лингвистичких термина. Тако је за опис улазне променљиве температуре T_{un} употребљен фази сет са терминима ниска (LT), средња (MT) и висока (HT). Улазна

променљива ΔT описана је са седам лингвистичких термина: екстремно ниска (WdT), веома ниска (VLdT), ниска (LdT), средња (MdT), висока (HdT), веома висока (VHdT) и екстремно висока (EdT), док је улазна променљива F_{gm} описана са ниска (LF), средња (MF) и висока (HF).

За опис излазне променљиве пад притиска ΔP одабран је сет од пет лингвистичких термина: веома низак (VLP), низак (LP), средњи (MP), висок (HP) и веома висок (VHP), док је за излазну



Слика 5. Функција трансформације

Таблица 2. Вредности скаларних параметара a, b и c за функције трансформације $f_i(x_i; a, b, c)$ (5)

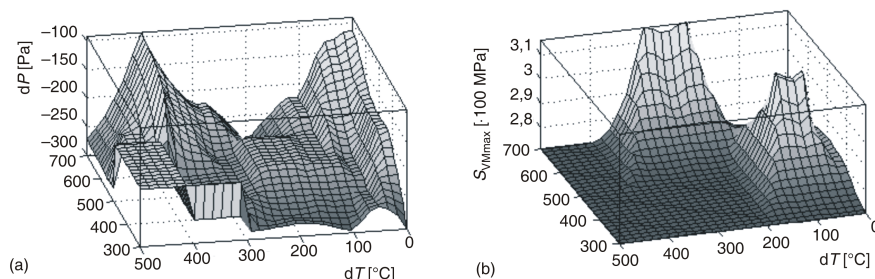
Улазне променљиве													
Функција	T_{in} [°C]			ΔT [°C]							F_{gm} [-]		
	LT	MT	HT	WdT	VLdT	LdT	MdT	HdT	VHdT	EdT	LF	MF	HF
a	300	300	500	0	0	50	100	200	300	400	1	1	2
b	500	500	700	0	50	100	200	300	400	500	1	2	3
c	500	700	700	50	100	200	300	400	500	500	2	3	3
Изразне променљиве													
Функција	ΔP [Pa]					σ_{VMmax} [10^8 Pa]							
	VLP	LP	MP	HP	VHP	LVM	MMV	HVM					
a	-100	-200	-300	-400	-400	2.04	2.04	2.71					
b	0	-100	-200	-300	-400	2.04	2.71	3.38					
c	0	0	-100	-200	-300	2.71	3.38	3.38					

променљиву максимална вредност остварених Фон Мисесових напона фази сет дефинисан преко појмова низак (LVM), средњи (MMV) и висок (HVM). Примењена фази логика заснована је на логичкој релацији:

$$\text{if } X \text{ then } Y \tag{6}$$

где је X улазни, а Y излазни скуп фази података. Сваком скупу улазних фази података додељује се скуп излазних коришћењем формираних правила и пондерисаног усредњавања методом центра тежишта:

$$y^* = \frac{\mu_i Y_i}{\mu_i} \tag{7}$$



Слика 6. Моделирање утицаја температуре унутрашње површине зида T_{un} [°C] и разлике температура унутрашње и спољашње површине зида канала ΔT [°C] на: (а) пад притиска ΔP [Pa] и (б) максималну вредност Фон Мисесових напона σ_{VMmax} [10^8 Pa]

У једначини (7) μ_i су функције трансформације излазне величине Y_i на основу i -тог правила. Формирано је укупно 104 различита правила за излазну величину dP и 52 за излазну величину σ_{VMmax} .

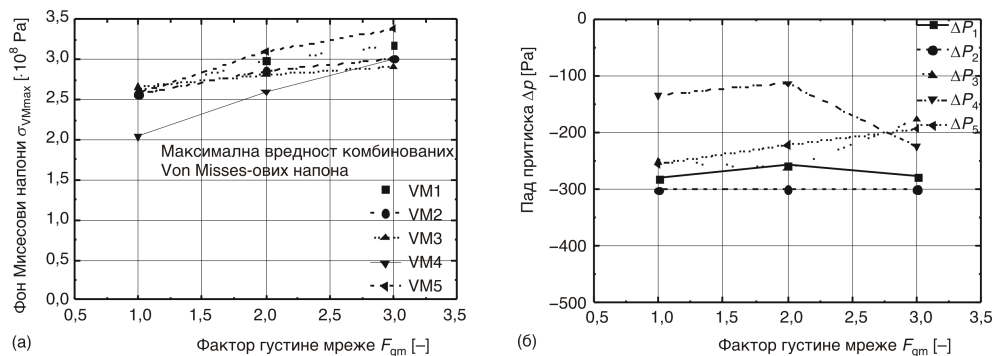
Коришћење већег броја функција трансформације захтева формирање већег броја правила пресликавања, чиме се омогућава добијање тачнијег резултата [15]. Међутим, осим што је потребно прикупити довољно велики скуп улазних података, значајно се усложњава и продужава поступак мануелног структурирања фази система. За формирање FLES модела, дефинисање базе функција и правила трансформације, процесирање формираних модела и приказ добијених резултата коришћен је софтверски пакет MATLAB.

У процесу формирања FLES моделиране су промене пада притиска ΔP [Pa] и максималне вредности Фон Мисесових напона σ_{VMmax} [10^8 Pa] у зависности од посматраних улазних променљивих фактора густине нумеричке мреже F_{gm} , температуре унутрашње површине зида канала T_{un} [°C] и разлике температура ΔT [°C] унутрашње и спољашње површине зида канала. Добијене зависности су у облику функционалних површина приказане на сл. 6. Видимо да моделиране излазне величине имају изразито нелинеаран карактер без обзира на једноставност развијеног FLES модела.

Резултати и дискусија

Извршено је укупно 52 нумеричка прорачуна интеракције флуид-структура параметарски дефинисаног проблема и формирана је база података добијених резултата. У табл. 1 су приказани резултати FSI анализе: пад притиска низ струју Δp као разлика статичких притисака у излазном и улазном пресеку и максимална вредност остварених Фон Мисесових напона у структури σ_{VMmax} .

Испуњавање услова конвергенције резултата нумеричког FSI прорачуна са повећањем густине нумеричке мреже испитивана је у случају неколико FSI модела формираних за различите вредности улазних параметара T_{un} , ΔT и F_{gm} . Вредности σ_{VMmax} добијене нумеричким FSI прорачуном приказане су на сл. 7(а), а вредности ΔP на сл. 7(б). Са сл. 7(а) се види да је задовољен услов конвергенције и да је приближавање асимптотском решењу, независном од вредности F_{gm} (односно од броја дискретизационих елемената), остварено преко нижих вредности σ_{VMmax} . Ово је



Слика 7. Резултати нумеричке FSI анализе у зависности од густине коришћених нумеричких мрежа; (а) σ_{VMmax} [10^8 Pa], (б) ΔP [Pa]

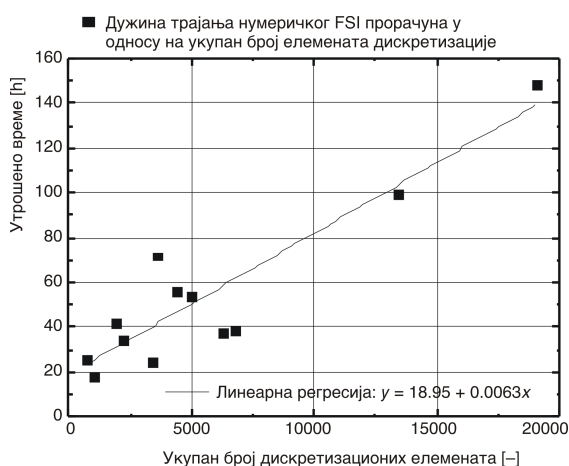
било и очекивано с обзиром да је структурални прорачун методом коначних елемената заснован на методи померања.

Са сл. 7(б) видимо да није експлицитно остварена конвергенција вредности пада притиска Δp са повећањем F_{gm} за сваки од посматраних FSI модела. Приказани резултати указују на то да је модел означен бројем 2 неосетљив на промену F_{gm} , модел бр. 5 показује скоро линеарну промену са повећањем F_{gm} , а да је за случајеве 1, 3 и 4 неопходно извршити додатне прорачуне са моделима за које је $F_{gm} = 3$.

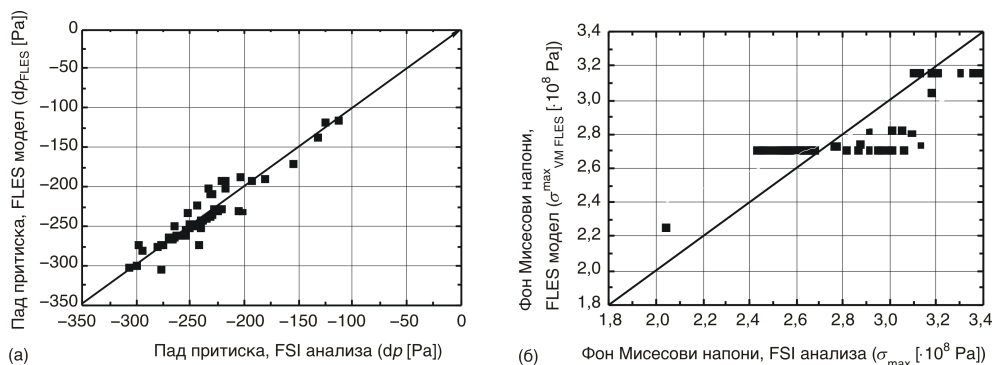
Осим од вредности фактора F_{gm} , време трајања нумеричког FSI прорачуна зависи од односа вредности задатих параметара T_{un} и ΔT . За неке моделе са $F_{gm} = 3$ и укупним бројем од 19035 дискретизационих елемената (коначних елемената љуске и коначних запремина), било је потребно и преко 150 сати да се на рачунарском систему AMD Athlon 64 2 Dual Core Processor 2,21 GHz, 1,87 GB RAM са 250 GB HDD добије финално решење (сл. 8).

Екстраполацијом линеарне регресије $y = 18.95 + 0.0063x$ (сл. 8) за веће вредности F_{gm} , добијамо да би било потребно око 637 сати за обављање нумеричког прорачуна за FSI модел који се састоји од око 100.000 дискретизационих елемената (што одговара фактору густине мреже $F_{gm} = 6$), док би за процесирање модела са око 300.000 елемената ($F_{gm} = 10$) било потребно 1909 сати.

Релативно скромне могућности коришћеног рачунарског система и услед тога потребно дуго време процесирања једног нумеричког FSI модела је основни



Слика 8. Време трајања нумеричког прорачуна интеракције флуид-структура (FSI) у зависности од вредности фактора густине нумеричке мреже F_{gm} [-]



Слика 9. Упоредни приказ резултата добијених коришћењем FLES модела и резултата нумеричке FSI анализе; (а) dp [Pa] и (б) σ_{VMmax} [10^8 Pa]

разлог зашто није формиран шири сет улазних података, који би обухватио већи број чланова скупова улазних променљивих. Утицај величине меморијског простора и осталих хардверских карактеристика рачунарског система на брзину и могућност спровођења нумеричког FSI прорачуна није анализиран у овом раду. Због свега наведеног, формиран фази систем је релативно једноставан и заснован на малом скупу улазних података (укупно $3 \cdot 52 = 156$, табл. 1).

Вредности пада притиска Δp добијене спрегнутим нумеричким симулацијама интеракције флуид-структура, као разлике прорачунатих вредности статичких притисака у улазном и излазном пресеку струјног домена, дате су на сл. 9(а) упоредо са вредностима пада притиска Δp_{FLES} које су добијене коришћењем формираног FLES модела. Без обзира што је сет улазних података био веома ограничен (по 52 податка за сваку од посматране три улазне променљиве), резултати добијени коришћењем FLES модела за тај сет улазних података су веома блиски резултатима спрегнуте нумеричке FSI анализе. Остварена је средња релативна девијација од 0,9% са граничним вредностима релативне девијације у опсегу $-13,8 \dots 14,3\%$ и $R^2 = 0,901$.

Максималне вредности Фон Мисесових напона деформисане структуре σ_{VMmax} добијене FSI нумеричком анализом дате су на сл. 9(б) упоредо са вредностима σ_{VMmax} FLES које је предвидео развијени FLES модел. Примећује се одступање добијених резултата манифестовано већим расипањем око праве на сл. 9(б), са оствареном вредношћу од $R^2 = 0,624$. Ово је директна последица чињенице да је излазна величина σ_{VMmax} моделирана са само три функције трансформације најједноставнијег троугаоног типа. Резултати добијени коришћењем FLES модела су груписани око вредности $2,3 \cdot 10^8$ Pa, $2,7 \cdot 10^8$ Pa и $3,5 \cdot 10^8$ Pa. За укупан сет резултата прорачунатих FLES моделом је остварена средња релативна девијација од 0,3% са граничним вредностима у опсегу $-12,5 \dots 12,5\%$.

Тачност развијеног FLES модела се додатно може побољшати коришћењем улазног сета са већим бројем података, посебно ако коришћени сет података садржи резултате прорачуна за граничне случајеве (нпр. $\Delta T = 0$). Утицај врсте коришћене функције трансформације на крајњи резултат се не може унапред проценити, већ то треба утврдити додатним анализама.

Закључак

Предмет овог рада је одређивање структуралних деформација правоугаоног, танкозидног, термички оптерећеног, челичног канала и утицаја остварених деформација на струјање флуида кроз канал. Протицање флуида кроз затворени канал променљивог попречног пресека карактерише неколико физичких појава које се описују системима изразито нелинеарних једначина, чије егзактно решење је практично немогуће добити у затвореном облику. У циљу одређивања напонско-деформационог стања структуре канала и параметара струјног поља потребно је спровести спрегнуте нумеричке прорачуне интеракције флуид-структура.

С обзиром на то да су нумерички прорачуни коришћењем методе коначних елемената и методе коначних разлика, на чијем спрезању је базиран прорачун интеракције флуид-структура, значајни генератори несигурности одређивања посматраних излазних параметара, развијен је експертски систем заснован на фази логици за моделирање уочених неодређености и нумеричку процену резултата интеракције флуид-структура. Посматрана је промена два излазна параметра – пада статичког притиска низ струју ваздуха и максимална вредност Фон Мисесових комбинованих напона у структури канала – у односу на три улазне променљиве – температуру унутрашње површине зида канала, разлике у температурама унутрашње и спољашње површине зида канала и броја дискретизационих елемената коришћених за моделирање посматраних нумеричких домена. За три улазна и два излазна параметра су, на основу резултата спроведених параметарских нумеричких FSI симулација, дефинисане функције трансформације троугаоног облика. Карактеристике функција трансформације одређене су мануелно на основу 3 52 = 156 улазна и 104 излазна податка и формирана су 104 различита правила пресликавања за излазну променљиву пад притиска и 52 правила за излазну променљиву максимални Фон Мисесов напон.

Поређењем вредности излазних променљивих добијених потпуним нумеричким FSI прорачуном са одговарајућим резултатима које даје FLES модел, можемо закључити да експертски систем заснован на фази логици може са довољном тачношћу предвидети вредности излазних променљивих. При томе је време трајања прорачуна применом FLES модела неупоредиво краће од времена потребног за спровођење комплексне нумеричке FSI анализе. Релативно одступање вредности пада притиска добијене коришћењем FLES модела у односу на одговарајуће вредности нумеричког FSI прорачуна било је мање него што је то био случај при одређивању релативног одступања прорачунатих вредности максималних Фон Мисесових комбинованих напона. Један од узрока томе лежи у чињеници да је излазна променљива пад притиска моделирана са 5, а максимални Фон Мисесов напон са 3 лингвистичка термина, којима су придружене функције трансформације троугаоног облика. При загревању зида канала, плоче које су пре загревања биле равне се извијају у форме таласног облика, зависно од услова ослањања плоче. До појаве извијања може доћи и изненадно, у зависности од нивоа и врсте оптерећења. Стога је потребно да скупови улазних и излазних параметара садрже што већи број чланова, до којих је могуће доћи једино спровођењем додатних нумеричких прорачуна интеракције флуид-структура. Када се идентификују скупови са довољним бројем чланова, могуће је додатно подешавати карактеристике FLES модела варирањем карактеристика изабране функције трансформације.

Време трајања нумеричког FSI прорачуна посматраног проблема зависи од броја и типа дискретизационих елемената којима су моделирани структурални и струјни нумерички домен, и од вредности задатих температура унутрашње и спољашње површине зида канала. У неким случајевима је прорачун трајао скоро 150 сати, док је време потребно за прорачун коришћењем развијеног FLES модела било неколико десетина секунди и практично независно од наведених улазних параметара. Развијени и оптимизовани FLES модел може бити искоришћен за одређивање посматраних излазних параметара у реалном времену.

Захвалност

Аутори изражавају захвалност Министарству образовања, науке и технолошког развоја републике Србије (Пројекти бр. III42010, TR33050 и TR35035) и ЈП Електропривреда Србије за подршку и промоцију овог рада.

Ознаке

- a, b, c – скаларни параметри функције трансформације, [-]
 $\{e_i\}$ – сопствени вектор тензора $[U]$, [-]
 F_{gm} – фактор густине мреже, [-]
 $f(x_i)$ – функција трансформације, [-]
 $\{L\}$ – јединична матрица, [-]
 ΔP_{FSI} – вредности пада притиска добијене нумеричким FSI прорачуном, [Pa]
 ΔP_{FLES} – вредности пада притиска добијене FLES моделом, [Pa]
 Δp – пад притиска низ струју, [Pa]
 $[R]$ – матрица ротације, [-]
 s, t – осе локалног правоуглог координатног система коначног елемента, [-]
 T_{in} – температуре унутрашње површине канала, [°C]
 T_{sp} – температуре спољашње површине канала, [°C]
 ΔT – разлике температура унутрашње и спољашње површине зида канала ($= T_{in} - T_{sp}$), [°C]
 $[U]$ – матрица промене облика, [-]
 u – функција померања у правцу осе x , [m]
 u_p – померања у чвору и у правцу оса глобалног правоуглог координатног система, [m]
 $\{u\}$ – вектор померања, [-]
 X – улазни скуп фази података, [-]
 x, y, z – осе глобалног правоуглог координатног система, [-]
 $\{x\}$ – вектор положаја у деформисаном стању, [-]
 $\{X\}$ – вектор положаја у недеформисаном стању, [-]
 Y – излазни скуп фази података, [-]

Грчки симболи

- $[\varepsilon]$ – вектор логаритамских деформација, [-]
 λ_i – сопствена вредност тензора $[U]$, [-]
 μ_i – функција трансформације излазне величине Y_i на основу i -тог правила, [-]
 σ_{VMmax} – максимални комбиновани Фон Мисесов напон, [10⁸ Pa]
 $\sigma_{VMmax FSI}$ – максималне вредности Фон Мисесових напона добијене FSI прорачуном, [10⁸ Pa]
 $\sigma_{VMmax FLES}$ – максималне вредности Фон Мисесових напона добијене FLES моделом, [10⁸ Pa]

Литература

- [1] Fairuz, Z. M., *et al.*, Fluid Structure Interaction of Unsteady Aerodynamics of Flapping Wing at Low Reynolds Number, *Engineering Applications of Computer Fluid Mechanics*, 7 (2013), 1, pp. 144-158, ISSN 1997-003X (Online)
- [2] Yang, X. L., Liu, Y., Yang, J. M., Fluid-Structure Interaction in a Pulmonary Arterial Bifurcation, *Journal of Biomechanics*, 40 (2007), 12, pp. 2694-2699, Elsevier Ltd, doi:10.1016/j.jbiomech.2007.01.008
- [3] Marković, Z., *et al.*, Fluid-Structure Interaction Plasma Coal Gasification Channel Computational Analysis, *Proceedings, 7th International Congress of Chemical and Process Engineering, Summaries 3 – Hydrodynamic Processes*, 27-31 August, Praha, Czech Republic, 1.049, 840-841, ISBN: 80-86059-45-6, CHISA 2006, 12006
- [4] Esmailzadeh, M., *et al.*, Three-Dimensional Modelling of Curved Structures Containing and/or Submerged in Fluid, *Finite Elements in Analysis and Design*, 44 (2008), 6-7, 334-345, Elsevier B.V., doi:10.1016/j.finel.2007.11.019
- [5] Glück, M., *et al.*, Computation of Fluid-Structure Interaction on Lightweight Structures, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89 (2001), 14-15, 1351-1368, Elsevier Science Ltd
- [6] Takagi, T., Sugeno, M., Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modelling and Control, *Proceedings, IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-15, 1, 116-132, 1985
- [7] Rao, A. V. S., Pratihari, D. K., Fuzzy Logic-Based Expert System to Predict the Results of Finite Element Analysis, *Knowledge-Based Systems*, Vol. 20, 37-50, Elsevier, B. V., doi: 10.1016/j.knosys.2006.07.004, 2007
- [8] Hossain, A., *et al.*, 2011, Prediction of Aerodynamic Characteristics of an Aircraft Model with and without Winglet Using Fuzzy Logic Technique, *Aerospace Science and Technology*, 15 (2011), 8, 595-605, Elsevier Masson SAS., doi:10.1016/j.ast.2010.12.003
- [9] Stefanović, P. Lj., *et al.*, Plasma Coal Gasification Section Thermal Structural Analysis, *Proceedings, International Conference on Physics of Low Temperature Plasma PLTP-03*, May 11-15, 2003, Navchalna Knyga, Kiev, Ukraina, 2004, 3-27-31
- [10] ***, ANSYS Release 12.0 Documentation for ANSYS, ANSYS Inc, April 2009
- [11] Menter, F. R., Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flow, AIAA Paper 93-2906, 1993
- [12] Demirdžić, I., Perić, M., Space Conservation Law in Finite Volume Calculations of Fluid Flow, *Int. J. Num. Methods in Fluids*, 8 (1998), Sept., 1037-1050, doi: 10.1002/flid.1650080906
- [13] Yari, E., Ayoobi, A., Ghassemi, H., Applying the Artificial Neural Network to Estimate the Drag Force for an Autonomous Underwater Vehicle, *Open Journal of Fluid Dynamics*, 4 (2014), 334-346, <http://dx.doi.org/10.4236/ojfd.2014.43025>
- [14] Mamdani, E. H., Assilian, S., An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller, *International Journal of Man-Machine Studies*, 7 (1975), 1, 1-13
- [15] Samuel Raja, A., Valan Arasu, A., Prediction of Cold Start Hydrocarbon Emissions of Air Cooled Two Wheeler Spark Ignition Engines by Simple Fuzzy Logic Simulation, *Thermal Science*, 18 (2014), 1, 179-191, DOI: 10.2298/TSCI120726106S

Abstract**Fuzzy Logic Expert System for Calculating the Parameters of Coupled Numerical Analysis of the Fluid and Thin-Walled Structures Interaction**

by

*Zoran MARKOVIĆ¹, Slobodan N. STUPAR², Mirko DINULOVIC²,
Pedrag STEFANOVIĆ¹, and Dejan CVETINOVIC¹*¹Laboratory for Thermal Engineering and Energy,
Vinča Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Belgrade, Serbia²Department of Aerospace Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Belgrade, Belgrade, Serbia

This paper deal with structural deformation of one rectangular, closed, thin walled, steel made, thermally loaded channel and influence of this deformation on the air flow through the channel, recognised as coupled fluid-structure interaction problem.

The geometrically non-linear deformation of thermally loaded channel was solved using commercial finite-element analysis software ANSYS. The unsteady Navier-Stokes equations in their conservation form defining fluid flow are solved using commercial computer fluid dynamics software ANSYS CFX.

A fuzzy logic-based expert system has been developed to predict some results of structural and fluid flow numerical simulation instead of directly evaluating it by a time-consuming software coupling of finite-element and computer fluid dynamics numerical analysis. Three input parameters, namely temperature of channel inner walls, difference in temperature of inner and outer surface of channel wall, and factor of mesh size, are varied while solving the fluid-structure interaction problem. A pressure drop downstream the flow was considered as a computer fluid dynamics output parameter of importance, while Von Mises maximum stresses were an finite-element analysis output parameter observed. The developed FLES can predict the results of finite-element and computer fluid dynamics analysis, a pressure drop and Von Mises maximum stresses respectively, within a reasonable accuracy limit and at lower computation cost compared to the finite-element, and CFD computer fluid dynamics packages combined into series of multi-physics analyses.

Key words: low temperature air plasma, fluid-structure interactions, fuzzy logic-based expert system

Corresponding author; e-mail: zoda_mark@vinca.rs

Рад примљен: 26. фебруара 2015
Рад ревидиран: 6. маја 2015
Рад прихваћен: 15. маја 2015