

**УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ**  
**МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ**

**Зоран Ј. Марковић**

**ИНТЕРАКЦИЈА ФЛУИДА И ТАНКОЗИДНЕ**  
**СТРУКТУРЕ ЗАТВОРЕНЕ КОНТУРЕ**

**докторска дисертација**

**Београд, 2016.**

**UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING**

**Зоран Ј. Марковић**

**THE INTERACTION OF FLUID AND THIN-WALLED  
STRUCTURE OF OPEN CONTOUR**

**Doctoral Dissertation**

**Belgrade, 2016.**

---

## Подаци о ментору и члановима комисије

Ментор: Проф. др Слободан Ступар,  
Машински факултет у Београду

Чланови Комисије: Проф. др Александар Симоновић,  
Машински факултет у Београду

Проф. др Мирко Динуловић,  
Машински факултет у Београду

др. Огњен Пековић, доцент  
Машински факултет у Београду

Проф. др Слободан Гвозденовић,  
Саобраћајни факултет у Београду

Датум одбране докторске дисертације:

---

Акију и Макију

---

## Предговор и захвалност

Велику захвалност дугујем ментору проф. др. Слободану Ступару на изузетно квалитетном и ефикасном вођењу процеса израде овог рада, као и на драгоценим саветима и сугестијама захваљујући којима је овај рад добио свој завршни облик. Захваљујући детаљним сугестијама и саветима др Огњена Пековића, доцента, квалитет материје приказане у овом раду је значајно побољшан, на чему сам му веома захвалан. Такође, захвалност дугујем и осталим члановима комисије на сугестијама и саветима којима су помогли да овај рад добије свој завршни облик.

Експериментали део овог рада је изведен у два наврата, и то први део у периоду од 2005. до 2007. године на пилот-плазматронском постројењу инсталираном на блоку А1 термоелектране ТЕНТ А, а други део у периоду 2010. до 2014. на експерименталном плазматронском постројењу у Институту за нуклеарне науке „Винча“, Лабораторији за термотехнику и енергетику. Без свесрдне подршке и помоћи др Предрага Стефановића и др Дејана Цветиновића, као и осталих драгих колегица и колега из Лабораторије за термотехнику и енергетику, не бих успео да овај посао завршим до краја. Веома сам захвалан на њиховој подршци и помоћи.

Зоран Марковић

# САДРЖАЈ

Апстракт	VI
Abstract	VIII
Списак ознака	X
1 Увод.....	1
1.1 Мотив и циљ рада.....	1
1.2 Преглед коришћене литературе.....	20
2 Основне полазне теоријске претпоставке.....	30
2.1 Линеарна теорија танкозидних термички оптерећених плоча са различитим граничним условима ослањања.....	30
2.2 Аналитичка решења неких случајева термички оптерећених плоча.....	34
2.2.1 Слободно ослоњена правоугаона плоча, спречених померања у $x$ правцу.....	35
2.2.2 Слободно ослоњена правоугаона плоча спречених померања у оба правца.....	37
2.2.3 Укљештена плоча са спреченим померањима на ивицама $x = 0, a$ и слободно ослоњена са дозвољеним померањима на $y = 0, b$ .....	38
2.2.4 Правоугаона плоча укљештена по свим ивицама и спречених померања.....	38
2.3 Основне једначине деформације танке љуске и плоче.....	39
2.4 Варијациона формулација.....	40
2.5 Основе теорије пластичности.....	41
2.6 Основне једначине струјања флуида.....	44
3 Коришћени модели дискретизације континуума.....	45
3.1 Матрични облик једначине равнотеже коначног елемента плоче.....	45
3.2 Одређивање својствених вредности система коначних елемената .....	46
3.3 Основне карактеристике нумеричког прорачуна струјања флуида.....	49
3.4 Карактеристичне временске скале.....	56
4 Нумерички модели .....	59
4.1 Нумерички модел структуре канала.....	59
4.1.1 Карактеристике коришћених коначних елемената .....	59
4.1.2 Гранични услови по померањима .....	60
4.1.3 Карактеристике материјала и коришћени модел.....	60
4.1.4 Густина нумеричких мрежа.....	65
4.1.5 Алгоритам уноса оптерећења у структурални модел.....	66
4.2 Гранични и почетни услови у струјном домену.....	68
4.3 Спрезање нумеричких прорачуна.....	70

5 Резултати истраживања.....	78
5.1 Резултати експерименталних истраживања.....	78
5.2. Резултати нумеричких прорачуна.....	90
5.2.1 Својствене вредности и форме вибрација модела коначних елемената.....	91
5.2.2 Претходни прорачуни термички оптерећених канала РГ и ЦГ.....	118
5.2.3 Утицај гравитациног оптерећења на деформисање структуре .....	119
5.2.4 Утицај развијеног струјног поља – линеарна анализа .....	121
5.2.5 Утицај развијеног струјног поља – нелинеарна анализа.....	122
5.2.6 Утицај термичког оптерећења канала.....	124
5.2.7 Канал при секвенцијалном гравитационом и термичком оптерећењу.....	135
5.2.8 Унос једносмерног притисног а затим термичког оптерећења у модел структуре канала.....	137
5.3 Резултати спрегнутих параметарских нумеричких прорачуна интеракције структуре канала и струје ваздуха са двосмерним преносом утицаја .....	140
5.4 Утицај деформисања канала на параметре струјања.....	152
5.5 Анализа перформанси прорачуна .....	159
6 Нумерички модели фази логике.....	165
6.1 Формирање модела фази логике.....	165
6.2 Резултати добијени коришћењем Mamdani модела .....	175
6.3 Резултати добијени коришћењем Sugeno модела .....	180
7 Закључак.....	184
Референце.....	192

**Наслов:**

ИНТЕРАКЦИЈА ФЛУИДА И ТАНКОЗИДНЕ СТРУКТУРЕ ЗАТВОРЕНЕ  
КОНТУРЕ

**Апстракт**

Интеракција флуида и танкозидне структуре коју флуид опструјава или протиче кроз њу је комплексан проблем који се среће у многим инжењерским дисциплинама. Домени две различите области динамике континуума, структуралне механике и динамике флуида, имају заједничку површ раздвајања. Предмет овог рада је интеракција термички оптерећеног канала аеросмеше и струје ваздуха који протиче кроз танкозидну структуру канала затворене контуре, састављену од хомогених, изотропних, челичних плоча. Услед спречених термичких дилатација у средњој површи танкозидног елемента, структура се деформише изазивајући промену облика струјног домена. У новом струјном домену се успоставља струјање другачије од струјања кроз недеформисани канал. Циљ рада је да се оцени утицај деформисане термички оптерећене структуре на струјно поље кроз канал и обратно.

Проблем је решен коришћењем нумеричких метода просторне дискретизације континуума. За прорачун напонско-деформационог стања зида канала коришћена је метода коначних елемената. Претпостављена су униформна температурска поља на унутрашњем и спољашњем зиду канала. Дискретизација структуралног домена је извршена коначним елементима љуске формираних на основу *Reissner-Mindlin*-ове теорије плоча и љуски. Материјал плоче је моделиран серијом билинеарних карактеристика у зависности од температуре, са *von Misses*-овим условом течења и одговарајућим моделом ојачања материјала. За статичке нелинеарне структуралне прорачуне великих померања и деформација применом Њутн-Рапсонова методе са инкременталним уносом оптерећења коришћени су алгоритми софтверског пакета ANSYS. Дискретизациона метода коначних запремина је коришћена за решавање Рејнолдс усредњених Навије-Стоксових једначина нестишљивог нестационарног струјања ваздуха кроз деформисани канал применом софтверског пакета ANSYS CFX. У циљу оцене дисторзије



мреже коначних запремина у деформисаном струјном простору, деформација мреже је дефинисана фактором крутости који зависи од удаљености од најближег зида. Једначине динамике флуида и структуралне механике су спрегнуте условом да су положај и брзина тачке која лежи на површи раздвајања ова два домена, исте у сваком од домена. У ту сврху је коришћена процедура итеративног узастопног спрезања ова два прорачуна. За пренос оптерећења између различитих домена коришћени су алгоритам претраге по блоковима и метода преноса утицаја интерполацијом са одржањем профила. Резултати прорачуна указују да модел преноса и карактеристике мрежа утичу на конвергенцију и добијени резултат.

На основу резултата серије спрегнутих нумеричких прорачуна интеракције флуида и структуре, развијени су модели фази логике за процену излазних параметара нумеричког прорачуна. Анализирани су утицаји четири улазна параметра - температуре унутрашње површине зида канала, разлике између температура унутрашње и спољашње површине зида, брзине струје на улазу у канал и густина нумеричких мрежа, на вредност пада статичког притиска низ струју и максималних комбинованих *Von Mises*-ових напона у структури канала. Добијени резултати указују да фази модели могу са задовољавајућом тачношћу бити искоришћен за процену посматраних излазних величина, при знатно краћем времену потребном за прорачун и уз ангажовање значајно мањих ресурса рачунарског система. С обзиром на тачност предвиђања вредности излазног параметра, фази модели Mamdani и Sugeno типа су показали одређену инфериорност у односу на трениране ANFIS моделе.

**Кључне речи:** танкозиде плоче, интеракција структура-флуид, фази модели

**Научна област:** Техничке науке

**Ужа научна област:** Машинство

**УДК број:** 532/533:517.9:519.6(043.3)

**Title:**

INTERACTION BETWEEN FLUID AND THIN-WALLED STRUCTURE OF  
CLOSED CONTURE

**Abstract**

Fluid - structure interaction is very complex problem that could be found in many branches of engineering. Structure mechanics and fluid dynamics are interconnecting on the surface of separatin of two different physical domains. The object of this work is interaction of thermally loaded air-coal mixture channel and air flow through the thin walled channel structure of closed conture, made of homogenous, isotropic, steel plates. Thermal load induce deformation of the channel wall into wave - type shapes depending on thermal load and fluid inlet velocity inducing the changes of fluid flow accordingly. The air flow through the new, deformed domain is different than flow through undeformed one. The goal of this work is to evaluate influence of thermally deformed channel on fluid flow and vice versa.

The problem is solved using methods of numerical spatial discretization. The finite element method is used for stress-strain calculation. Thermal load is supposed as uniformly distributed temperature fields on inner and outer surface of the channel's walls. Structure is discretized by shell finite elements based on Reissner-Mindlin formulation. Material model describe a series of bilinear temperature dependent characteristics, von Misses yield conditions and appropriate flow and hardening rules. The incrementally loaded structural model with geometric and material nonlinearities is solved by Newton-Ralphson method using ANSYS software. The unsteady Navier-Stokes equations are numerically solved using an element-based finite volume method and second order backward Euler discretization scheme. The algorithm of ANSYS CFX software is used for the fluid flow solution. In order to evaluate deformation of flow domain mesh due to deflection of the plates, additional variable, namely mesh stiffnes, is solved. The mesh stiffnes parameterer is related to the distance from the nearest wall, as well as the level of the mesh deformation. The computational structural mechanics and computational fluid dynamics are coupled by the condition that displacement and velocity of the point laying in the interface surface are the same for both domains. The

implicit two-way iterative code coupling, partitioned solution approach, were used while solving these numerical tests. The bucket search algorithm and profile preserving interpolation method were used for load transfer between dissimilar meshes. A set of fluid - structure interaction (FSI) numerical tests have been defined by varying the values of fluid inlet velocity, temperature of inner and outer surface of the channel wall and numerical grid density. The results of this set of numerical calculations indicate that model of load transfer used and meshes characteristics influence convergence of the calculation and obtained results.

In the inverse problem, the results of FSI numerical simulations formed a database of input variables used for development of fuzzy logic based models. The fluid inlet velocity, temperature of inner and outer surface of the channel wall and numerical grid density were input variable while downstream pressure drop and maximum von Mises stresses were considered as the objective functions. Developed fuzzy models predicted targeting results within a reasonable accuracy limit at lower computation cost compared to series of FSI numerical calculations. Mamdani and Sugeno fuzzy models shows lower performance in predicting output variables comparing to results of trained ANFIS models.

**Key words:** thin-walled structure, fluid-structure interaction, fuzzy model

**Scientific field:** Technical Sciences

**Specific scientific field:** Mechanical Engineering

**UDC number:** 532/533:517.9:519.6(043.3)

---

## Списак ознака

$A$	[-]	квадратна симетрична матрица
$A_{ij}$	[-]	коефицијенти серије функција у јед. (2.1.7)
$\alpha$	[-]	коефицијент вишка ваздуха
$a, b$	[m]	димензије посматране плоче у правцу $x$ - и $y$ -осе
$a_{\alpha\beta}$	[-]	метрички тензор средње површи љуске
$b_{\alpha}^{\beta}$	[-]	тензор кривина средње површи љуске
$c_v$	[J/K]	топлотни капацитет при константној запремини
$B$	[t/h]	капацитет млина
$B$	[-]	фактор пропорционалности
$d$	[m]	удаљеност (од зида, пог. 3.3)
$D$	[Nm]	крутост плоче на савијање
$dA$	[m <sup>2</sup> ]	површина посматраног елемента плоче
$E$	[Pa]	модуло еластичности
$F_i$	[N]	компоненте вектора спољашњих сила у јед. (2.1)
$F_{gm}$	[-]	фактор густине мреже
$f$	[Hz]	природна фреквенца
$\bar{g}$	[m/s <sup>2</sup> ]	гравитационо убрзање
$\Gamma_{ET}$	[%]	грешка одређивања природне фреквенце $100 \cdot (f_{ET} / f_{m,n} - 1)$
$h$	[m]	дебљина зида плоче[m]
$h_{тоб} h$	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	тотална и статичка енталпија, пог. 2.6
$[I]$	[-]	јединична матрица
$i, j$	[-]	индекси
$ip$	[-]	тачка интеграције, пог. 3.3
$j$	[-]	координатни правац у ком се простире топлота
$\kappa$	[J/mK]	коефицијент топлотне проводљивости
$k$	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	кинетичка енергија турбуленције по јединичној маси
$L$	[m]	растојање
$m, n$	[-]	број полуталаса у правцу $x$ и $y$ осе
$\dot{m}$	[kg/s]	масени проток, пог. 3.3
$[M]$	[kg]	матрица маса система

---

$M_T$	[Nm]	термички индуковани моменат
$N_{cr}$	[N/m]	критичне вредности оптерећења
$N_i$	[m <sup>3</sup> ]	интерполациона функција, пог. 3.3. и 4.1.1
$N_T$	[Pa]	термички индуковани напон
$N_x, N_y$	[N/m]	линијско оптерећење у равни средње површи у $x, y$ -правцу
$N_{xy}$	[N/m]	смичуће оптерећење у равни средње површи
$P_{st}$	[Pa]	статички притисак
$\Pi_A$	[J]	енергија извијања средње површи плоче, јед. (2.1.3)
$\Pi_d$	[J]	енергија савијања еластичне плоче, јед. (2.1.2)
$\Pi_M$	[J]	енергија термички индукованих момената, јед. (2.1.4)
$\{Q\}$	[-]	<i>Krylov</i> сет ортогоналних вектора
$\{q\}$	[-]	чланови <i>Krylov</i> -ог сета ортогоналних вектора
$r$	[-]	виткост
$S_\sigma, S_u$	[-]	део контуре чврстог тела са граничним условима по површинском оптерећењу / померањима
$S_M$	[kg/m <sup>2</sup> s <sup>2</sup> ]	изворни члан количине кретања
$S_E$	[kg/ms <sup>3</sup> ]	енергетски изворни члан
$[S]$	[-]	геометријска матрица крутости
$T$	[°C]	температура
$t$	[s]	време
$t_{as}$	[°C]	температура аеросмеше
$T_{Okkr}$	[°C]	вредност критичне температуре
$T_{ref}$	[°C]	референтна температура
$t_{sv}$	[°C]	температура секундарног ваздуха
$T_{un}$	[°C]	температура унутрашњег зида канала
$T_{sp}$	[°C]	температура спољашњег зида канала
$\Delta T$	[°C]	разлика температура
$U$	[m/s]	брзина звука
$u, s, t$	[m]	локалне координате елемента, пог. 3.3 и 4.1.1
$X_i, Y_j$	[-]	функције апроксимације у јед. (2.1.7)
$z$	[m]	координата нормална на средњу површ
$x, y, z$	[m]	осе координатног система
$U$	[m/s]	вектор брзине (пог. 2.6)

---

$U_{i,j,k}$	[m/s]	компоненте вектора брзине (пог. 3.3)
$u$	[m]	померање у правцу $x$ осе
$u_{i,j}$	[-]	извод компоненте померања у правцу $j$ -те осе
$\tilde{u}$	[m]	вектор задатих померања
$V_{ul}$	[m/s]	брзина на улазу у канал
$v$	[m]	померања у правцу $y$ осе
$w$	[m]	померања у правцу $z$ осе
$W_f$	[kg/ms <sup>3</sup> ]	вискозни рад

### Слова грчког алфабета

$\alpha$	[1/°C]	кофицијент ширења
$\alpha_i$	[-]	кофицијенти у јед. (2.2.12)
$\beta_{ln}$	[-]	параметри функције апроксимације
$\beta_i$	[-]	кофицијенти у јед. (2.2.10)
$\beta'$	0,09	кофицијент у јед. (3.3.7)
$\Gamma$	[kg/ms]	дифузивност
$\Gamma_{pom}$	[1/m]	фактор крутости дискретизационе мреже, јед. (3.3.17)
$\delta_{ij}$	[-]	симбол <i>Kronecker</i> -а
$\varepsilon_{\alpha\beta}$	[-]	тензор мембранске деформације
$\{\phi_i\}$	[-]	својствени вектор
$\lambda_i$	[-]	косинуси углова нормале $n$ са осами $x$ , $y$ , $z$ , јед. (2.1)
$\lambda_i$	[-]	$i$ -та својствена вредност
$\lambda, \mu$	[-]	кофицијенти <i>Lame</i> -а у јед. (2.2)
$\lambda$	[kgm/Ks <sup>3</sup> ]	термичка проводљивост, пог. 2.6
$\mu_{eff}, \mu, \mu_t$	[kg/ms]	ефективна, динамичка и турбулентна вискозност
$\mu_i, \eta_i$	[-]	кофицијенти у једначинама (2.2.9) и (2.2.11)
$\varepsilon_{\alpha\beta}$	[-]	тензор мембранске деформације, јед. (2.3.1.1)
$\varepsilon_{Li}, \varepsilon_{Ni}$	[m]	линеар. и нелинеар. компоненте вектора деформације
$\kappa_{\alpha\beta}$	[-]	тензор деформације савијања, јед. (2.3.1.1)
$\sigma_{ij,j}$	[N/m <sup>2</sup> ]	компоненте тензора напона у јед. (2.1)

---

$\sigma_y$	[N/m <sup>2</sup> ]	напон при појави течења
$\sigma_{VM}^{MID}$	[N/m <sup>2</sup> ]	<i>von Mises</i> -ови напони у средњој површи плоче
$\varepsilon_{ij}$	[-]	компоненте тензора деформација јед. (2.3)
$\gamma_{xz}, \gamma_{yz}$	[-]	смичуће деформације
$\varphi$	[-]	скаларна промењива
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	густина
$\omega$	[1/s]	угаона брзина

### Списак акронима

<i>FSI</i>	- <i>fluid – structure interaction</i>
РГ	- канал правоугаоног попречног пресека
ЦГ	- канал кружног попречног пресека
ЕТ	- тип коначног елемента
БЕ	- број елементата по пресеку плоче
МР	- модел преноса утицаја
ТЕ	- термоелектрана
<i>CSM</i>	<i>Computational Structural Mechanics</i>
<i>CFD</i>	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
<i>FEM</i>	<i>Finite Element Method– MKE</i>
<i>FVM</i>	<i>Finite Volume Method– МКЗ</i>
<i>IPC</i>	<i>Inter-Process Communication</i>
<i>TCP/IP</i>	<i>Transmission control protocol / Internet Protocol</i>
<i>ALE</i>	<i>Arbitrary Lagrangian – Eulerian</i>
<i>ANFIS</i>	<i>Adaptive neuro-fuzzy inference system</i>
RMS	<i>root mean square</i>
KBS	метод термичког оптерећења
НПК	број поткорака уноса оптерећења
ПК	број корака уноса оптерећења

## 1 Увод

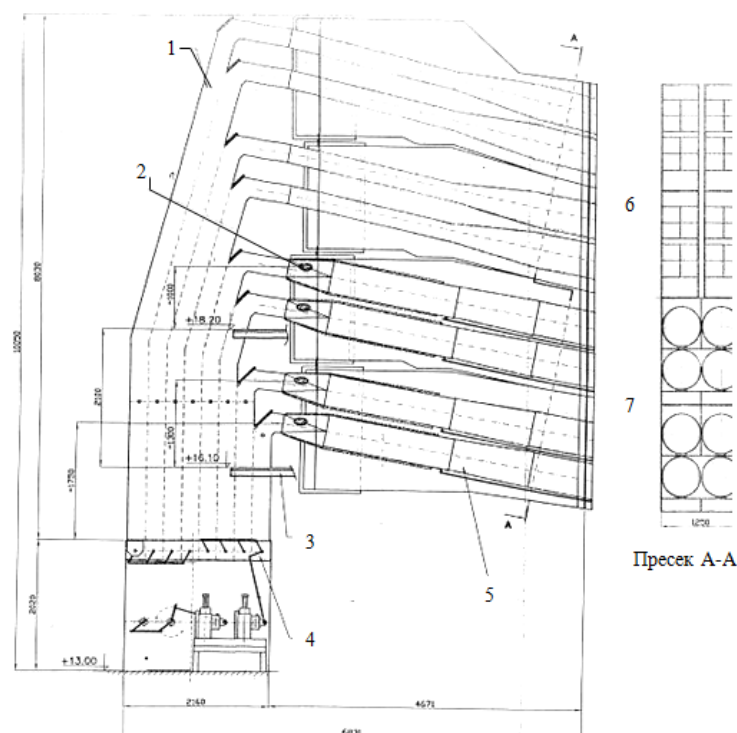
### 1.1 Мотив и циљ рада

За потпаљивање и одржавање ватре при ниским оптерећењима блока, у ложишту котла А1 210 MW ТЕ "Никола Тесла" користи се мазут. Блок је у ту сврху опремљен посебним мазутним постројењем и одговарајућим горионцима. Котао блока А1 има шест индивидуалних система за припрему угљеног праха колубарског лигнита са вентилаторским млиновима (максималног капацитета 68 t/h) и директним удувавањем аеросмеше рецикулационих гасова, примарног ваздуха, испарене влаге и угљеног праха у ложиште кроз  $6 \times 8 = 48$  проточна (млазничка) горионика. Аеросмеша рецикулационих гасова са примарним ваздухом, испареном влагом и угљеним прахом, температуре 160-180°C, долази из млина у сепарациону шахту и даље по вертикалном каналу до разделника. Ту се дели и скреће бочно кроз 8 правоугаоних канала пресека 0,26x1,23м који улазе у одговарајуће горионичке пакете. Секундарни ваздух се убацује кроз паралелне канале испод и изнад сваког млазника у пакету (слика 1.1).

Као нов метод потпаљивања оваквих горионика којим се постиже замена течних и гасовитих горива користи се плазматронска технологија. Развој плазматронске технологије код нас у претходном периоду односио се на њену примену за подршку ватре на блоку ТЕНТ А1 и предвиђен је да буде алтернативни постојећом мазутном систему, првенствено при нижим оптерећењима [1]. Плазмени систем заснива се на замени мазута самим угљеним прахом који се претходно подвргава термохемијској припреми у горионику или каналу аеросмеше под дејством ваздушне плазме која овде служи за иницирање процеса. Суштина предложеног решења заснива се на локалном коришћењу електролучне плазме тј. потпалом мале масе аеросмеше започиње сложени, ланчани процес термохемијске припреме горива у термички изолованом делу канала аеросмеше пре уласка у ложиште котла. Практично се ради о аналогiji са припалом гасовитих горива или бензинских пара електричном варницом, односно локално



генерисаном плазмом. Избору снаге плазматрона, месту и начину његове уградње као и режиму рада канала аеросмеше треба посветити нарочиту пажњу. Студија *Stefanović* и др. [2] која је семиемпиријским приступом анализирала утицај процеса гасификације аеросмеше луком нискотемпературске плазме, предвидела је температуру унутрашње површине зида правоугаоног канала без промене пресека у нивоу од 600 - 1200°C у зависности од удаљења од плазматрона.



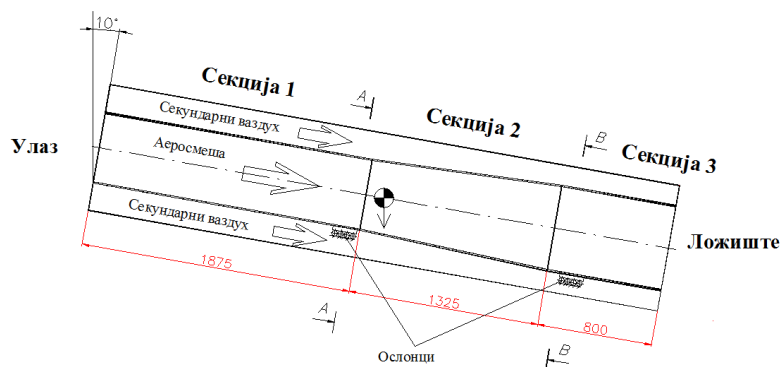
**Слика.1.1** Изглед реконструисаних горионичких канала са плазматронима горионичких пакета (млина 2 и 5) на котлу А1 210 MW ТЕ "Никола Тесла": 1 - разделник аеросмеше, 2 - место уградње плазматрона, 3 - платформа за опслуживање плазматрона, 4 - систем клапни (жалузина) за регулисање раздвајања аеросмеше на горње и доње канале (горионике), 5 - канали аеросмеше, 6 - горњи нереконструисани део горионичког пакета, 7 - доњи део горионичког пакета са реконструисаним горионицима

На основу ових резултата, извршена је серија нумеричких статичких структуралних термонапонских анализа више модела који репрезентују могућа конструктивна решења реконструкције канала аеросмеше горионичког пакета [3]. Једно од решења се односи на првобитно предложено, које се у потпуности базира на постојећој - равној геометрији (РГ), тј. каналу правоугаоног попречног пресека

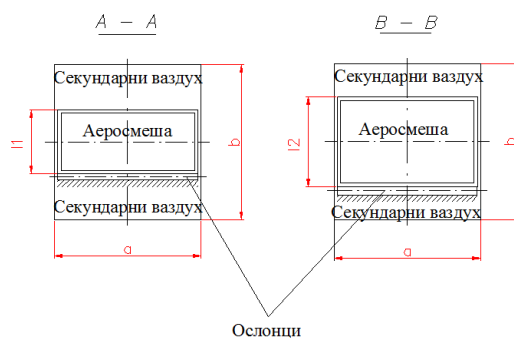
1.23x0.26m који се у средишњем делу конусно шири по висини од 0.26m до 0.5m, остајући непромењеног попречног пресека све до уласка у ложиште (слика 1.2б). Друго решење се односи на новопредложену цилиндричну геометрију (ЦГ) где се са једног канала правоугаоног попречног пресека, преко прелазне секције, прелази у два паралелна цилиндрична канала чија је промена попречног пресека по дужини идентична (слика 1.2ц). Код оба решења је предвиђено да канали у односу на почетни пресек могу по дужини слободно да се шире ослањајући се на пар клизних-котрљајућих ослонаца.

Резултати добијени серијом нумеричких прорачуна *Pavlovic* и др. [4], *Stefanović* и др. [5] за различите геометријске концепције канала и системе ослањања, при различитим вредностима термичког оптерећења претпостављеног као униформно температурско поље на унутрашњим и спољашним зидовима канала, показали су предност предложене ЦГ концепције у односу на остале. Предност се огледа у мањим вредностима померања тачака структуре и нижим вредностима напона који се генеришу у структури термички оптерећеног канала. Вредности претпостављених температура на зидовима канала су усвојене на основу упрошћених прорачуна за дату геометрију канала. и кретале су се од 720-888°C за температуру на унутрашњим, а од 709-889°C за вредност температуре на спољашњим зидовима канала. У датој конструкцији проблеми термички изазваних померања тачака структуре канала и напрезања која се јављају у структури канала нису у толикој мери изражени обзиром на умерени ниво оптерећења и разлику између температура радних флуида који протичу кроз њих (температура аеросмеше  $t_{as}=165^{\circ}\text{C}$ , температура секундарног ваздуха  $t_{sv}=250^{\circ}\text{C}$ ). Као резултат горе наведених анализа као најповољније решење за очекиване, битно погоршане, температурске услове ( $t_{as}>700^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{sv}=250^{\circ}\text{C}$ ) предложена је концепција ЦГ [1] са посебним системом ваљкастих ослонаца (слика 1.2ц). Нови систем (пилот постројење) за подршку ватре у ложишту са 16 плазматрона нискотемпературне плазме, био је инсталиран на 4 доња канала аеросмеше горионика бр. 12 и 15 на блоку А1 210 MW ТЕ "Никола Тесла" [1]. Четири доња горионичка канала, правоугаоног попречног пресека 0,26m x 1,23m, за ову сврху

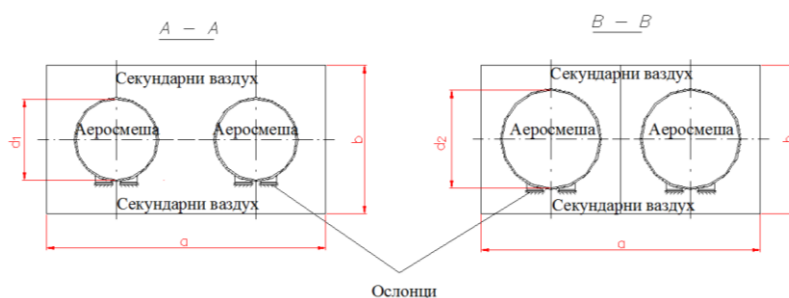
су реконструисани сходно предложеној ЦГ концепцији и сваки од њих замењен са по два канала кружног попречног пресека пречника  $D = 0,5\text{m}$  (слика 1.3).



а) бочни поглед на канал



б) канал правоугаоног попречног пресека (РГ)



в) канал кружног попречног пресека (ЦГ)

**Слика 1.2** Поглед са стране (а) и геометријске карактеристике канала правоугаоног (б) и кружног (в) попречног пресека, ознаке геометријских конфигурација РГ и ЦГ респективно

На сваком од ових канала уграђен је бочно на растојању  $L=4,25\text{m}$  од уласка у ложиште котла по један електролучни плазматрон номиналне снаге  $100\text{kW}$ .

Вертикални размештај реконструисаних горионичких канала са плазматронима горионичких пакета млинова 2 и 5 на котлу А1 ТЕ "Никола Тесла" приказан је на слици 1.1. Изглед уграђених плазматрона на каналима дат је на слици 1.4.



*Слика 1.3 Канал кружног попречног пресека концепције ЦГ пре уградње на блоку А1 термоелектране ТЕНТ А*

Истраживања на пилот постројењу обављена током 2007 и 2008 год. обухватила су експериментално одређивање великог броја параметара рада горионичког пакета и канала аеросмеше, млинског, плазматронског и блоковског постројења као и лабораторијско одређивање карактеристика угља, шљаке и пепела. Извршена су одговарајућа мерења расподеле брзина, температуре и концентрације угљеног праха по пресецима појединих горионичких канала. Прикупљени подаци формирају обимну базу података о посматраним процесима за различите погонске параметре котла и блока ТЕНТ А1, а део обрађених података дат је детаљно у *Pavlovic* и др. [6]. Добијени резултати су показали да плазматронско подпаљивање и подршка ватре на постојећим проточним горионичким млинова котла ТЕНТ А1 захтева адекватно решење раздвајања аеросмеше и повећање количине примарног ваздуха у аеросмеси горионичких канала са плазматронима. Са друге стране, примена ефикасних раздвајача у циљу обезбеђивања оптималне концентрације угљеног праха доводи до значајног повећања аеродинамичког отпора у млинском кругу које коришћени

вентилаторски млинови не могу да савладају. Услед тога долази до гушења млина и значајног пада његовог капацитета. Треба истаћи и чињеницу да је сама могућност њихове примене везана са проблемом ограниченог простора за смештање таквих уређаја у оквиру постојеће конструкције млинских кругова.



*Слика 1.4 Приказ уграђених плазматрона на горионичким каналима*

Претходним нумеричким симулацијама процеса гасификације применом плазма лука који генерише плазматрон снаге 100kW, за три различите геометријске концепције канала аеросмеше, *Sijerčić* и др. [7] су добили вредности температуре гаса на нивоу 660°C у локализованој зони одмах иза плазматрона, а око 180-200°C у осталом делу канала. На основу резултата мерења температура аеросмеше у пресеку канала и температура спољашњег зида канала обављених током 2006. и 2007. године утврђене су знатно више вредности температура које су се кретале и преко 1000°C у струји аеросмеше и неравномерна расподела температуре у структури канала са вредностима и до 900°C у одређеним зонама одмах иза плазматрона. Поред експерименталних испитивања на пилот постројењу, извршени су прорачуни термодинамички равнотежног хемијског састава и укупне енталпије двофазне мешавине угљени прах + транспортни гас у делу горионичког

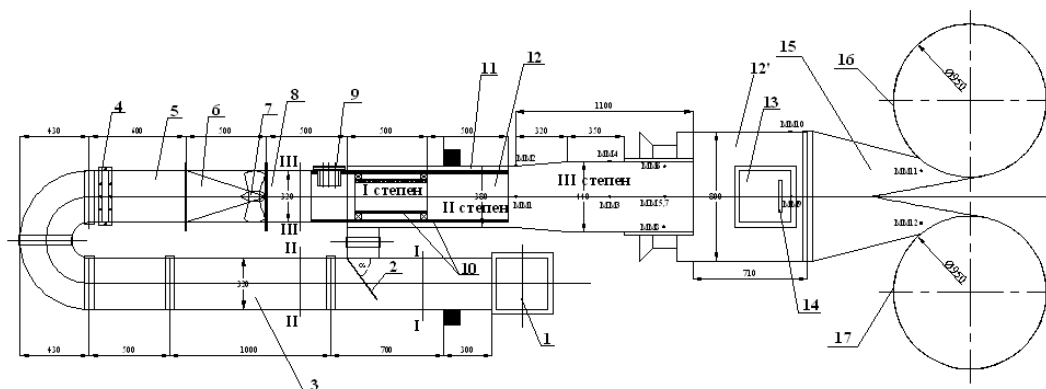
канала за плазмахемијску припрему и извршена је упрошћена анализа кинетике плазмахемијског процеса базирана на емпиријским зависностима за прорачун времена трајања појединих карактеристичних фаза кроз које пролазе честице угљеног праха током процеса термохемијске припреме [6]. Посебна пажња је посвећена анализи експлозионих карактеристика спрашеног лигнита и брзини простирања пламена у горионичком каналу, која је од важности са аспекта безбедности рада плазматронског постројења. Као основни закључци ове студије утврђено је да:

- време боравка честица угљеног праха у горионичком каналу је условљено оствареним аеродинамичким условима у каналу,
- енергетски најефикаснији процес се постиже при нижим вредностима коефицијента вишка ваздуха ( $\alpha = 0,15-0,3$ ) и температурама ( $T_{as} = 700^\circ\text{C}$ ),
- при још нижим температурама процеса смањује се стабилност и доводи се у питање сама могућност спровођења процеса припреме угљеног праха,
- при већим капацитетима млина могућност успешне реализације процеса пламене припреме је отежана јер је у том случају брзина аеросмеше у горионичким каналима велика а температура има ниже вредности,
- процес пламене припреме при жељеној температури у аеросмеси  $T_{as} = 800-900^\circ\text{C}$  остварив при нижим капацитетима млина  $B = 25-40 \text{ t/h}$ , али је тада енергетска ефикасност процеса на доњој граници прихватљивости и има изразиту тенденцију пада са порастом коефицијента вишка ваздуха,
- ниске вредности остварених концентрација угљеног праха отежавају могућност потпаљивања и простирања процеса припреме по целом пресеку горионичког канала, те је од посебне важности одабир такве геометрије горионичког канала која ће обезбедити равномернију расподелу концентрације угљеног праха по пресеку канала и добро мешање дела аеросмеше захваћеног дејством плазме са преосталим делом аеросмеше.

За потребе развоја вртложног горионика са каналима кружног попречног пресека за плазма припрему је у Лабораторији за термотехнику и енергетику Института Винча током 2010-те год. изграђено лабораторијско постројење са вртложним

гориоником детаљно описаних карактеристика у *Стефановић* и др. [8]. Шематски приказ лабораторијског плазма постројења са основним елементима дат је на слици 1.5. Постројење представља специјални експериментални ваздушни канал у облику слова U. На једном крају овог канала, квадратног попречног пресека, налази се основни центрифугални средњепритисни вентилатор за снабдевање горионика примарним и секундарним ваздухом. Укупан ваздух се од вентилатора, доводи каналом од челичног лима, попречног пресека 320x320mm. Доводни канал се затим рачва на основни канал и грану за увод секундарног ваздуха. На самој рачви се налази регулациона клапна секундарног ваздуха. Други крај овог канала, кружног попречног пресека, наставља се горионичком секцијом канала. Горионичка секција се састоји из неколико степени израђених од ватроотпорног челичног лима (ознаке JUS Č.4578, W.Nr. 1.4841 или EN/DIN X15 CrNiSi 25-21). Изведено стање експерименталног плазматронског постројења види се у позадини слике 1.6, док се у првом плану исте слике види рачунарски систем за управљање и аквизициони систем за мерење температура и статичких притисака у пресецима канала експерименталног постројења. Бункер за смештај припремљеног угљеног праха је релативно мали и омогућава експерименте у трајању до 30s. За праћење температура у горионику током експеримената коришћене су специјалне термосонде на бази термопарова хромел-алумел високе осетљивости. Термосонде су постављене дуж вертикалне и хоризонталне централне осе попречног пресека горионичког канала на излазу II степена, у средини III степена горионика, на излазу IV степена и на улазу у скрубере (слика 1.5). Прикупљање сигнала са термопарова током експеримента врши се аутоматски аквизиционим системом који чине вишеканални аквизитер, рачунар и програм за аквизицију. До сада је обављено укупно 52 експеримената на основу којих су прикупљени подаци о разним параметрима рада експерименталног постројења и извршене су лабораторијске карактеризације коришћеног угља и део добијених резултата дат је у студији *Стефановић* и др. [9]. Табеларно су приказани основни параметри сваког од обављених експеримената. Резултати обављених експеримената указују да су при неким од експеримената остварене температуре аеросмеше у излазном пресеку II степена (слика 1.5) у нивоу од 1200°C, у излазном пресеку III степена у

нивоу од 1100 - 1200°C а на улазу у скрубер чак 1000°C. Резултати мерења температуре аеросмеше по попречном пресеку канала указују да се температура аеросмеше у излазном пресеку II степена горионика смањује од око 1200°C у оси горионика на вредност од око 900°C близу зида горионика, док је у пресеку који се налази на средини III степена горионика тај пад мањи и креће се од 1150°C у оси до 1050°C ка зиду горионика [9].



**Слика 1.5** Шематски приказ лабораторијског постројења са вртложним гориоником за плазмену стабилизацију сагоревања угљеног праха у лету

Легенда:

- |                             |  |
|-----------------------------|--|
| 1. Колено канала            | 11. Канал секундарног ваздуха                  |
| 2. Регулациона клапна       | 12. Горионички канал                           |
| 3. Одводни канал            | 12'. Комора сагоревања                         |
| 4. Прирубница дозатора      | 13. Контролни отвор                            |
| 5. Секција са дозатором     | 14. Окно за снимање                            |
| 6. Прелазна секција         | 15. Излазни канал (уводник у скрубер)          |
| 7. Вртложник                | 16. Скрубер 1                                  |
| 8. Канал аеросмеше          | 17. Скрубер 2                                  |
| 9. Прирубница за плазматрон | 18. ММ1-ММ10 мерна места температуре аеросмеше |
| 10. Керамичка изолација     |  |

Остваривање одговарајућег масеног протока честица угља кроз канале аеросмеше као и одговарајуће расподеле угљеног праха по попречном пресеку канала представљају веома важне технолошке и техничке захтеве, како би се обезбедили оптимални услови за одвијање топлотног плазма третмана. У лабораторији за термотехнику и енергетику института "Винча" се већ дуже време посвећује пажња истраживању процеса сагоревања угљеног праха у лету. На основу резултата



експерименталних истраживања на ложиштима са млазним и вртложним гориоником, *Saljnikov* [10] је развио нумерички модел сагоревања честица угљеног праха у струји вртложног горионика користећи SIMPLE алгоритам софтвера TEACH. Ова студија је указала да присуство вихорних и вртложних структура омогућава бољу ефикасност паљења и сагоревања у случају вртложног горионика, показала осетљивост процеса од гранулације и расподеле концентрације угљеног праха на улазу у горионик и истакла потребу за даљим усавршавањем модела међусобног дејства честица и турбулентног тока гаса.

Упоредо са експерименталним истраживањима на пилот-плазматронском и лабораторијском плазма постројењу, у Лабораторији за термотехнику и енергетику је настављено са нумеричким симулацијама турбулентног двофазног тока ваздух – угљени прах кроз комплексну геометрију горионичког пакета [10] са циљем постизања нумеричке оптимизације протока флуида и расподеле честица угљеног праха у реконструисаним каналима аеросмеше (слика 1.2.б). Резултати прорачуна спроведених за две различите геометрије и позиције турбулатора указују на то да без обзира на остварени допринос у унуформности расподеле честица коришћењем једног турбулатора, њихова расподела у посматраном пресеку монтирања плазматрона је и даље неравномерна, са великим утицајем на ефикасност процеса плазмахемијске припреме. Мање честице (пречника 50  $\mu\text{m}$  - 90  $\mu\text{m}$ ) прате флуидну струју без јаких удара са зидовима, те су релативно правилно распоређене по попречном пресеку горионичког канала. Насупрот томе, веће честице (пречника 200  $\mu\text{m}$  - 2000  $\mu\text{m}$ ) имају довољно велику кинетичку енергију да пробију гранични слој и директно се сударају са зидовима. Ово доводи до изразито неравномерне расподеле честица по попречном пресеку канала горионичког постројења. Како су велике честице углавном сконцентрисане у доњој половини канала, а плазма генератор постављен бочно на средини канала, ово доводи до неповољних услова за хемијски плазма третман угљеног праха у лету. *Jovanović* и др. [11] су закључили да је за правилан рад плазма генератора потребно остварити фину мељаву али и успоравање крупнијих честица угља и њихово дуже задржавање у зони дејства плазменог лука, на пример проширењем улазног дела канала.

Упоредо са експерименталним истраживањима наставило се и са развојем нумеричких модела фрагментације, паљења и сагоревања честица угљеног праха. У студији *Jovanović* и др. [12] је уочено да гасификација нискотемпературним плазменим луком изазива велике температурске градијенте у честицама угљеног праха и њихов термички шок и фрагментацију на више мањих честица, што значајно доприноси процесу издвајања испарљивих, али да ефикасност процеса зависи од путање и времена изложености честице дејству плазменог лука.



*Слика 1.6 Експериментално плазматронско постројење са рачунарским системом за управљање и аквизиционим системом за мерење температура и притисака у каналу*

У оквиру анализе утицаја геометрије термички оптерећеног канала на струјно поље, у Лабораторији за термотехнику и енергетику су извршене нумеричке симулације интеракције термички оптерећене структуре канала РГ са струјом ваздуха применом методе коначних елемената [13] за оба физичка домена, као и спрегнути нумерички прорачуни методом коначних елемената за структурални домен термички оптерећеног канала РГ и методом коначних запремина за домен флуида [14]. Термичко оптерећење структуре канала је сходно резултатима [5,7] претпостављено као равномерно расподељено температурско поље на

унутрашњим зидовима канала од 720°C и на спољашњим зидовима канала од 709 °C. Резултати спроведених симулација указују да деформисање канала РГ има значајан утицај на струјно поље кроз канал. Са друге стране, резултати извршених спрегнутих нумеричких прорачуна применом методе коначних елемената за термички оптерећени канал ЦГ и методе коначних запремина за домен флуида који протиче кроз канал [14,15] указују да концепција са кружним попречним пресеком са котрљајућим ослонцима при високим термичким оптерећењима остварује скоро осносиметричну промену облика са минималним утицајем на струјно поље кроз канал.

На основу свих досадашњих истраживања, остварени резултати указују да је за успешно потпаљивање и остваривање делимичног сагоревања угљеног праха у термоизолованој секцији канала аеросмеше, при датој снази плазматрона, датим геометријским и температурским условима и оствареном саставу аеросмеше у каналу, потребно да након локалног паљења дела честица угљеног праха буде остварено простирање пламена и сагоревање угљеног праха и у суседним областима. Основни параметри од којих зависи остварење овог циља су време које честица угљеног праха проведе у одређеним зонама канала и путања којом се кроз те зоне креће, који зависе од масе и величине честице (мељаве), расподеле концентрација и брзина честица на улазу у канал и аеродинамичких услова у зонама канала [10-12]. Облик и величина зоне дејства плазменог лука зависи од расподеле брзинског поља на улазу у канал. При већим брзинама плазмени лук се више повија низ струју услед чега се смањује зона његовог дејства у попречном а повећава у подужном правцу канала. Као последица рада плазматронског система долази до неравномерног и у неким зонама веома интензивног термичког оптерећења структуре канала, услед чега се, у зависности од геометрије, услова ослањања и укрупњавања структуре канала, могу појавити термички индуковани напони чак и у зони пластичности материјала [13-15]. Очекивано циклично локално загревање – хлађење канала услед промене режима рада млина и плазматронског постројења негативно утиче на радни век канала.

Иако је показана предност ЦГ концепције канала аеросмеше у односу на концепцију РГ с обзиром на утицај који термички оптерећена структура канала има на струјно поље кроз канал, у разматрању следеће фазе развоја плазма система за потпалу и подршку ватре са вртложним горионцима и његове примене на каналима аеросмеше термоелектрана, концепција са каналима правоугаоног попречног пресека је и даље актуелна највише из разлога што не захева додатне реконструктивне захвате замене постојећих канала са каналима кружног попречног пресека, чиме се смањују и трошкови.

Предмет овог рада је истраживање међусобног утицаја струје ваздуха и структуре термички оптерећеног канала аеросмеше кроз који протиче ваздух, при чему је посебна пажња посвећена каналу правоугаоног попречног пресека. Посматрани канал је кутијаста танкозида структура састављена од заварених челичних плоча дебљине зида  $h = 10\text{mm}$ , са чије спољашње стране се налазе слојеви стаклене вуне, опшивене алуминијумском оплатом. Основне геометријске карактеристике канала приказане су на слици 1.2. Услед дејства плазменог лука и процеса гасификације и сагоревања угљеног праха у каналу температура аеросмеше расте и преко  $1000^\circ\text{C}$  изазивајући неравномерно загревање зидова канала. Услед загревања се у танким зидовима канала, који су заварени за профилисане носаче и међусобно, јављају термички индуковани напони који изазивају њихово извијање и у одређеној мери деформисање. Осим термичког, зидови канала су изложени и дејству притисног оптерећења струјног поља и утицају гравитације. Најдоминантнији начини преноса топлоте на структуру канала су радијационо дејство плазменог лука и плазмахемијски припремљеног дела аеросмеше и конвективни пренос топлоте са аеросмеше на зидове канала. Стога термичко оптерећење у смислу расподеле температура на унутрашњим и спољашњим површинама зидова канала зависи од радног режима плазматрона, радног режима горионика односно млинског постројења, дебљине и стања изолације.

Један од циљева овог рада је да се одреди ниво термички индукованих деформација танкозидног канала и утицај добијених деформација на струјање ваздуха кроз канал, за опсег очекиваних нивоа термичког оптерећења и услова

струјања којима је канал изложен током рада млинског и плазматронског постројења. Две области нелинеарне механике континуума, механика деформабилног тела, тачније њена подобласт теорија љуски и плоча и подобласт динамике флуида, сусрећу се на заједничкој површини додира (односно раздвајања) два различита физичка домена – домена чврстог деформабилног тела и домена флуида.

Проблеми механике деформабилног тела су по својој природи нелинеарни. Геометријске везе између деформацијских и кинематичких величина су у општем облику нелинеарне. Једначине равнотеже између спољашњих утицаја и унутрашњих сила које се успостављају на деформисаном телу су такође нелинеарне, те заједно са претходним карактеришу проблеме геометријске нелинеарности. Конститутивне везе које описују физичке карактеристике посматраног материјала су у великом броју случајева такође нелинеарне и односе се на проблеме физичке односно материјалне нелинеарности [16]. Као посебна подгрупа издвајају се они проблеми где је једна димензија тела значајно мања од остале две, као што је то случај са љускама и плочама. Иако се заснивају на истим претпоставкама, формулација теорије танких љуски [17 - 21] је знатно сложенија од теорије танких плоча [17,19-21] и без обзира на евентуална упрошћавања тензора деформације, везе између дилатација (клизања) и померања у општем случају остају нелинеарне. Математичка формулација наведеног проблема се може приказати као гранични проблем тј. у облику диференцијалних једначина и одговарајућих услова на контури или у варијационој формулацији преко варијационих једначина које имају облик функционала, односно преко интегралних једначина. Без обзира који облик математичке формулације наведеног проблема се користи, решавање успостављених система једначина је изузетно сложено, како због њихове механичко-физичке тако и математичке природе, те се зато не могу увек добити аналитичка решења у виду изведених формула. Са друге стране, проблем струјања флуида је дефинисан системом парцијалних диференцијалних једначина које описују закон одржања масе, количине кретања и енергије за посматрани домен флуида, или временски усредњених једначина заједно са додатним једначинама турбуленције за случајеве

где су инерцијални ефекти довољно велики у односу на ефекте вискозности. Чак и уз значајна поједностављења за најједноставније случајеве струјања под идеалним условима, тешко је доћи до аналитичког решења споменутог система једначина.

Посебну класу представљају проблеми са међусобним утицајем танкозидних плоча/љуски и флуидног тока, при чему делови танкозидне структуре остварују велика померања а понекад и деформације, мењајући при томе геометрију струјног домена који је у додиру са структуром а тиме и граничне услове на њему. Са друге стране, новоуспостављено струјно поље мења граничне услове по силама на границама структуралног домена које леже у површи раздвајања ова два различита физичка домена. Проблеми интеракције флуида и структуре се у страниј литератури означавају скраћеницом *FSI (Fluid Structure Interaction)*.

До аналитичког решења овакве врсте проблема често је тешко или скоро немогуће доћи, али зато убрзани развој рачунарске технике омогућава примену и даље усавршавање одраније познатих нумеричких метода. Успостављањем нових метода и алгоритама пружа се могућност нумеричког решавања ове класе проблема коришћењем рачунара. Структурална нумеричка анализа (*Computational Structural Mechanics - CSM*) се бави нумеричком прорачуном напонско-деформацијских величина у телу подвргнутом различитим спољашњим оптерећењима. Прорачунска динамика флуида (*Computational Fluid Dynamics - CFD*) као грана механике флуида користи нумеричке анализе и алгоритме за решавање струјног поља флуида око структуралних елемената. Ове две нумеричке дисциплине се сусрећу на граничним површинама домена чврсте структуре и свака од њих у оквиру свог сета резултата прорачунава оптерећења / граничне услове за ону другу. У сврху нумеричког решавања ових проблема интензивно се користи метода физичке дискретизације континуума. Основна идеја ове методе је "стара отприлике колико и људско настојање да се тешко решиви проблеми замене једноставнијим, за које се лакше налазе решења" [22]. Један од најраније забележених случајева примене ове идеје је начин на који је грчки математичар и физичар Архимед израчунао границе између којих се налази вредност броја  $\pi$ , апроксимирајући контуру круга уписаним и описаним

полигонима са коначним бројем страна. Са развојем рачунарске технике CSM и CFD се све чешће базирају на методама дискретне анализе, прва на методи коначних елемената – МКЕ (*Finite Element Method* - FEM), а друга на методи коначних запремина – МКЗ (*Finite Volume Method* - FVM). У овом раду се нећемо бавити осталим методама и шемама дискретизације, нити великим бројем разних других нумеричких метода које се примењују у CSM и CFD.

У МКЕ основу за разматрања представља део домена коначних димензија – коначни елемент. Скуп коначних елемената за цео домен чине систем или мрежу коначних елемента, који су међусобно повезани у коначном броју тачака – чворовима. Поље померања, деформација, напрезања, простирања температуре исл. се описује помоћу унапред изабраних интерполационих функција и коначног броја параметара у чворовима, које представљају основне непознате величине. Овим приступом се основне једначине помоћу којих се описује стање у једном коначном елементу, а помоћу којих се формулише и проблем у целини, са диференцијалних или интегралних преводе у обичне линеарне [22, 23]. За решавање нашег проблема одређивања напонско – деформационог стања у структури канала аеросмеше коришћен је комерцијални софтверски пакет ANSYS чији је алгоритам базиран на МКЕ метода померања [24]. Софтвер користи принцип виртуалног рада у комбинацији са *Rayleigh–Ritz* –овом методом. За дискретизацију структуралног домена коришћени су коначни елементи љуске формиран на теорији смицања првог реда, описани у поглављу 4.1.1. Појаве геометријске и нелинеарности материјална су узете у обзир развојем тангентне матрице крутости на начин како је то описано у поглављима 2.4 и 3.1. Коришћени модел пластичности је класичан билинеарни са кинематским ојачањем и *Von Misses* – овим условом течења (поглавље 2.5). За решавање добијеног сета линеаризованих једначина коришћена је Њутн-Рапсонова (*Newton-Raphson*) итеративна метода. Оптерећење је уношено инкрементално, према унапред задатом кораку уноса оптерећења. С обзиром на постојање раванске симетрије структуре у односу на  $x$ - $z$  раван (слика 1.2), структурални домен је успостављен над једном половином канала, уз услов симетрије како је то објашњено у поглављу 4.1.2. У циљу поједностављења, у овом раду није моделиран феномен

преношења топлоте, већ је термичко оптерећење структуре канала моделирано задавањем граничних услова униформних температурних поља на унутрашњој и спољашњој површини зида канала, при чему је претпостављена линеарна промена температуре кроз дебљину плоче. Дејство гравитације је узето у обзир.

У МКЗ се у општем случају, струјни домен дискретизује нумеричком мрежом у дискретне контролне запремине око чворова мреже, над којима се врши интеграција и дискретизација транспортних једначина у циљу добијања алгебарских једначина дискретних зависно промењивих (непознатих) као што су брзине, притисак, температура и др. за целу групу чворова у мрежи. Дискретизацијом је очуван принцип одржања флукса сваке од промењивих кроз границе контролне запремине. Линеаризацијом дискретизованих једначина и решавањем добијеног система линеарних једначина добијају се вредности зависно промењивих [25]. За решавање струјања ваздуха кроз деформабилни канал у овом раду је коришћен комерцијални софтверски пакет ANSYS CFX заснован на МКЗ [26]. Споменути софтверски пакет користи неструктуриране нумеричке мреже. Алгоритам користи вредности промењивих у чворовима и итерполационе функције облика као у случају коначних елемената за апроксимацију вредности промењивих и њихових градијената у тачкама интеграције, које су линеарне по координатама локалног координатног система елемента. Алгоритам софтверског пакета ANSYS CFX користи тзв. спрегнути солвер за истовремено решавање хидродинамичких једначина (за  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ,  $p$ ) као јединственог система са потпуном имплицитном дискретизацијом једначина у сваком временском кораку. О неким специфичностима алгоритма софтверског пакета ANSYS CFX биће речи у поглављу 3.4.

У оквиру итеративне процедуре спрезања два различита нумеричка прорачуна, на начин како је то описано у поглављу 4.3, просторно и у времену дискретизоване нелинеарне диференцијалне једначине којима су описана понашања структуре и флуида решавају се одвојено, сваки сет у одоварајућем софтверском пакету. Оба прорачуна пролазе кроз серију узастопних корака развоја глобално спрегнутог прорачуна међусобне интеракције (*couplong step*), у оквиру којих се спроводи



више итерација спрезања CSD и CFD нумеричких прорачуна (*stagger coupling iterations*). У оквиру сваке од итерација спрезања се спроводе секвенцијално један па други нумерички прорачун. Након задовољења услова конвергенције у сваком од прорачуна, врши се провера испуњеност услова конвергенције глобалног прорачуна. Ако је задовољен, прелази се у нови корак развоја глобално спрегнутог прорачуна међусобне интеракције. У супротном, врши се размена података о прорачунатим величинама у чворовима који леже у површи раздвајања и започиње нова итерација спрезања.

Размена података између различитих нумеричких CSD и CFD прорачуна се врши путем интерног комуникацијског алгорита развијеног од стране компаније ANSYS, заснованог на IPC (*Inter-Process Communication*) протоколу, који користи клијент-сервер инфраструктуру TCP/IP (*Transmission control protocol / Internet Protocol*) протокола. У прорачунима чији су резултати приказани у поглављу 5, размена информација између различитих нумеричких прорачуна је вршена двосмено (*two – way coupling*). Вредности координата положаја и брзина, који се добијају решавањем формираних система једначина динамике флуида и структуралне механике, морају за чворове сваке од дискретизационих мрежа који леже у површи раздвајања структуралног и струјног нумеричког домена да буду идентички једнаке. Стратегија померања мреже заснована на аналогiji са понашањем еластичног медија и увођењем параметра крутости дискретизационе мреже је коришћена за процену померања чворова мреже коначних запремина услед деформисања струјног домена (поглавље 4.3).

Алгоритмом спрезања нумеричких прорачуна који се одвијају у оквиру софтверских пакета ANSYS и ANSYS CFX су при почетној и у свакој наредној тачки синхронизације, врши пренос информација о тренутном положају чворова граничне површи структуралног домена и сходно томе корекција положаја чворова струјног домена који су на почетку симулације спрезања лежали у додирној површи. На основу координата положаја чворова обе дискретизационе мреже у површи раздвајања врши се њихово мапирање на површ раздвајања. Пренос информације из једног у други нумерички прорачун у виду граничног

услова по померањима или оптерећењу се спроводи према алгоритму одређивања најближег чвора у дискретизационој мрежи на коју се утицај преноси (*bucket search algorithm*) и методе интерполације са одржањем профила расподеле утицајене величине (*profile preserving interpolation method*).

Спрегнути нумерички *FSI* прорачун заснован на методама дискретизације МКЕ и МКЗ без обзира да ли се спроводе истовремено или секвенцијално (узастопно), је због захтева да два одвојена нумеричка прорачуна размењују податке између себе и након тога наставе са решавањем практично новоуспостављених проблема за сваки од њих, другачијих од проблема који су решавани у претходном кораку, веома захтеван у погледу брзине и величине меморије коришћеног рачунарског система. Осим на стабилност и саму конвергентност, овако дефинисан *FSI* прорачун утиче директно и на време које је потребно да се такав један прорачун изврши, а које је значајно веће него што је збир времена потребних за обављање раздвојених нумеричких *CSD* и *CFD* прорачуна за случајеве неспрегнутих међусобних утицаја. Са друге стране, тачност резултата спрегнутог прорачуна зависи од много параметара, између осталог и од квалитета дискретизационих мрежа. Један од параметара за оцену квалитета мреже је и величина елемента, пратећи општеприхваћену логику да што је дискретизациони елемент мањи то је мања и очекивана грешка прорачуна. Са смањењем величине, односно повећањем броја дискретизационих елемената расте и време потребно за извршење нумеричких прорачуна. У Лабораторији за термотехнику и енергетику института Винча не постоји озбиљнија рачунарска платформа адекватна за једноставније и брже решавање предметног проблема интеракције канала и струје ваздуха. Сви прорачуни су обављени на персоналном рачунару AMD Athlon 64x2 Dual Core Processor 2.21 GHz, 1.87GB RAM са 250GB HDD. Стога се појавила потреба за разматрањем могућности да се до процене резултата *FSI* прорачуна интеракције структуре канала и флуида који кроз канал протиче, оствареног спрезањем нумеричких прорачуна МКЕ и МКЗ за одређене улазне параметре термички оптерећеног канала, дође на други начин, који би био значајно краћи и не тако захтеван по питању рачунарских ресурса. У ту сврху су у оквиру ове дисертације истражене могућности примене модела теорије фази логике које је основе још

1965. године поставио *Zadeh* [27], а која са развојем рачунарске технике све више налази примену у многим областима које се сусрећу са проблемима контроле и уривљања, обраде сигнала исл. Упоредо, примена модела фази логике све више налази примену и у многим областима инжењерства где се до процене решења изразито нелинеарних проблема не може доћи једноставно. У поглављу 6 су описани формирану модели и резултати добијени коришћењем модела фази логике.

Један од циљева овог рада је развој и оптимизација нумеричких модела фази логике за процену излазних параметара нумеричког *FSI* прорачуна. Сет резултата добијен је нумеричким *FSI* прорачунима за улазне параметре температуре на унутрашњој површини зида канала, разлике температура унутрашње и спољашње површине зида канала, брзине струјања ваздуха на уласку у канал и густине дискретизационе мреже структуралног и струјног домена, чије су вредности вариране у постављеним границама. Из добијеног сета резултата, издвојен је подскуп вредности пада притисака низ струју и максималне вредности *Von Misses*-овог напона, чије вредности су, заједно са вредностима скупа улазних параметара, искоришћене за формирање и оптимизацију фази модела. У ту сврху је коришћен софтверски пакет *MATLAB* [28].

## 1.2 Преглед коришћене литературе

Решења великог броја различитих проблема савијања и извијања танкозидних љуски и плоча, различитих геометријских карактеристика, са различитим условима ослањања и за различите услове спољашњег оптерећења могу се наћи у *Jones* [17], *Timoshenko* [19,20], *Lukasiewicz* [21]. Као једноставнији проблеми за које постоји јединствено решење, решени су првенствено проблеми за мала померања са деформацијама у области еластичности материјала, под претпоставком да средња површ не мења своје димензије. У општем случају, велика померања прати и деформисање средње површи плоче [19], тако да

нормалне и смичуће силе у средњој површи плоче више не зависе само од спољашњег оптерећења унетог у равни недеформисане средње површи, већ и од деформација средње површи услед савијања. Ово значајно усложњава математичку интерпретацију проблема а приближна решења су дата само за неколико специфичних проблема [17, 20, 21]. Применом услова о минимуму потенцијалне енергије као збира енергије деформације и енергије савијања средње површи за проблем великих померања након губитка стабилности слободно ослоњене плоче притиснуте у подужном и спречених померања у попречном правцу, уз претпостављене функције померања средње површи у правцу оса координатног система изабране тако да задовољавају граничне услове, добијено је приближно решење напонског стања у плочи и описана појава да танкозидне плоче могу носити значајно веће оптерећење и након губитка стабилности, захваљујући чему се као структурални елементи широко примењују у ваздухопловству, бродоградњи и сл. [17, 19].

Математичка формулација граничног проблема термоеластичности је веома комплексна због међусобне повезаности теорија еластичности и провођења топлоте, али је у инжењерској пракси често оправдано претпоставити да се механички члан у енергетској једначини и инерцијални члан у једначинама кретања (осим за проблеме термички индукованих вибрација) могу занемарити [29]. Прва претпоставка практично значи да деформисање тела под дејством спољашњег оптерећења не изазива значајну промену температуре у телу, која би услед тога довела до његовог термичког ширења. Друга претпоставка подразумева да деформације изазване неравномерном или променом расподеле температура у телу која се може сматрати довољо спором, имају занемарљив утицај на расподелу и промену температуре у телу. На практичним примерима потврђена је оправданост увођења наведених претпоставки [29]. Ако гранични услови ослањања термички оптерећене плоче нису у потпуности дефинисани, као доња вредност процене њене носивости обично се користи класично решење термички оптерећене правоугаоне слободно ослоњене плоче, *Jones* [17]. При критичном оптерећењу при којем долази до губитка стабилности плоча се извија у облик са по једним полуталасом у оба правца ( $m = 1, n = 1$ , где је  $m, n$  број

формираних полуталаса у уздужном и попречном правцу респективно). Када је расподела температуре униформна по њеној површини или симетрична у односу на дијагоналу средње површи плоче, доћи ће до губитка стабилности. У супротном не постоји симетрија расподеле напона у средњој површи плоче те долази до извијања или испупчења [17].

Појава међусобне интеракције флуида и структуре коју тај флуид опструјава је предмет многобројних истраживања у разним областима инжењерства, првенствено у ваздухопловству [30-43] али и конструкцији турбомашина [42], мостова [44], нуклеарној индустрији [45], биомеханици и медицини [46]. Напредак у алгоритмима прорачунске механике паралелно са константним развојем рачунарске технике и порастом компјутерских ресурса омогућили су извођење комплексних спрегнутих нумеричких анализа интеракције флуида и структуре применом рачунара.

У одвојеним студијама *Dowell* [43] и *Barone* [47] су анализирали карактеристике више различитих метода за моделовање *FSI* проблема. У зависности од физичких претпоставки, *Ducoin* и др. [34], *Attar* и др. [40], *Sigrist* [48] су примењивали моделе са једносмерним (*one - way*) преносом утицаја са циљем да се поједностави и убрза добијање крајњег резултата за проблеме где једна физичка област значајно утиче на другу али где утицај друге области на прву може бити занемарен. Међутим, интензивно су примењивани и модели са двосмерним (*two - way*) преносом оптерећења и граничних услова [33, 35-38, 39, 41, 49-52], када је било неопходно у потпуности моделирати међусобну двосмерну интеракцију струјног и структуралног физичког домена. *Herrick* [42] је аероеластичне појаве при опструјавања вентилатора у случају непоремећене и струје са синусиодалним поремећајем притиска на улазној равни вентилатора решавао користећи оба приступа и истакао предности и мане сваког од њих за посматрани случај. Као подобласти механике континуума, *CSD* и *CFD* засноване на методама дискретизације физичког простора се баве нумеричком анализом дела простора који заузима материја са специфичним физичким карактеристикама, чврсто тело или флуид. Стога су одређени *FSI* проблеми дискретизовани и решавани, на

пример, применом или само МКЕ или само МКЗ. Једна од предности оваквог приступа се огледа у томе да, обзиром да су оба физичка домена дискретизована истим типом дискретизационих елемената само другачијих карактеристика, не постоје многи проблеми везани за формулацију начина преноса утицаја из једног у други нумерички домен, јер не постоји површ раздвајања два домена са различитим дискретизационим елементима. Друга предност је што се за оба физичка домена формира јединствени сет линеаризованих једначина у зависности од коришћене методе дискретизације, који може бити решен коришћењем једног софтверског пакета. Међутим, како због физичке природе разматраних проблема и њихових математичких формулација, тако и због специфичности математичких формулација различитих дискретизационих метода, класа проблема струјања флуида за чије је решавање могуће применити на пример МКЕ (у оквиру које постоје развијени различити типови коначних елемената флуида) је много шира од класе проблема структуралне механике које је могуће једноставно решити применом на пример МКЗ. У студији *Esmailzadeh* и др. [36] проблем вибрација танкозидног резервоара у интеракцији са течности која се налази у њему је решен коришћењем нумеричког прорачуна структуре применом МКЕ под дејством аналитички одређене расподеле статичког притиска. Добијено решење је упоређено са решењем нумеричке *FSI* симулације коришћењем софтверског пакета ANSYS, у којој је извршена спрега прорачуна применом МКЕ структуре дискретизоване коначним елементом еластичне љуске и прорачуна расподеле притисака у течности применом МКЕ и коначног елемента флуида.

Међутим, проблеми који се јављају при промени положаја границе раздвајања нумеричких домена остају и даље присутни. Начини нумеричког решавања проблема покретних граница домена се могу сврстати у две категорије: методе покретних мрежа (*moving grid methods*) и методе фиксних мрежа (*fixed grid methods*). Једна од метода покретних мрежа коју су применили *Donea* и др. [53] је произвољна *Lagrangian – Eulerian* метода (*Arbitrary Lagrangian – Eulerian ALE*) која уводи додатне промењиве брзине кретања мреже и практично представља начин за решавање једначина конзервације у покретном координатном систему.

У циљу одржавања конзистентности решења CSD и CFD нумеричких прорачуна у површи раздвајања њихових домена, остваривања конвергенције и захтеване тачности како оба нумеричка прорачуна тако и нумеричког прорачуна њиховог спрезања, развијани су и примењивани различити механизми нумеричког спрезања два суштински различита типа нумеричких прорачуна. Прва група су модели тзв. слабог спрезања (*weak coupling*) где се размена података између CSD и CFD нумеричког прорачуна врши на крају сваког, или чак након неколико корака развоја глобалног нумеричког прорачуна спрезања када се спроводи и провера испуњености глобалних услова конвергенције. Овај приступ су применили у својим радовима *Esmailzadeh* и др. [36], *Attar* и др. [40]. Што је чешћа размена информација између CSD и CFD нумеричких прорачуна и провера услова глобалне конвергенције, то је форма спрезања јача, што су применили *Fairuz* и др. [38] и *Frandsen* [44]. Међутим, чвршће спрезање нумеричких прорачуна за последицу има продужавање времена потребног за извршење прорачуна. Једна груба процена је да ће у случају јаког спрезања CSD и CFD нумеричких прорачуна бити потребно 2 – 5 пута више времена за спровођење нумеричког CFD прорачуна применом МКЗ и софтверског пакета ANSYS CFX у односу на случај слабо спрегнутих прорачуна [26].

У зависности од физичких карактеристика разматраног проблема и усвојених претпоставки, *Eloy* и др. [30], *Doaré* и др. [54], *Guo* и др. [55] су примењивали различите стратегије спрезања нумеричких прорачуна за решавање проблема аеродинамичке стабилности и флатера танких плоча. У студији *Gordnier* и др. [31] коришћено је окружење једног софтверског пакета у МКЗ са неструктурираним мрежама за добијање просторно временских тачних резултата моделирања једног динамичког *FSI* проблема почетка флатера крила AGARD 445.6. Уочена је предност коришћења једне мреже у циљу елиминације нумеричких проблема када се примењују гранични услови на додирној површини између два домена. Са друге стране, утврђено је да је веома проблематично генерисати мрежу потребног квалитета у оба домена (и домену флуида и домену структуре). Рачунарски захтеви по питању времена потребног за прорачун и меморијског простора

потребног за смештај података су велики, јер ова *FSI* симулација захтева финију мрежу и краћи временски корак, односно снажније рачунарске системиме.

Утицај термички оптерећених танкозидних љуски и плоча на параметре струјног поља са којим су у контакту и обратно је веома актуелан проблем који се среће у различитим областима инжењерства. Међутим, проблем нумеричке симулације интеракције флуида и структуре се значајно компликује ако се у разматрање узме и размена топлоте између флуида и структуре. Са развојем рачунарске технике појављује се све већи број радова који се баве спрегнутим струјно-термичко-структуралним симулацијама. Тако су у студијама [49-51] истраживани проблеми танке плоче подвргнуте аеродинамичком загревању и дејству промењивог притиска. Релативно мали број аутора се бавио узајамним двосмерним спрезањем нумеричких симулација аеродинамичког загревања и структуралних деформација. Увођењем претпоставке о стационарној расподели температура на додирној површини струјног и структуралног домена, *Culler* и *McNamara* [49] као и *Zhao* и др. [51] су у својим радовима поједноставили спрегнути струјно-термичко-структурални нумерички прорачун занемаривањем нестационарне природе термичке анализе при двосмерном спрезању. Главни разлог за увођење овакве претпоставке о расподели температура је то што тачност оваквог комплексног прорачуна током времена и његова стабилност зависе од многих параметара моделовања. Нумерички CSD и CFD прорачуни се одвијају у значајно краћим временским скалама него један нумерички прорачун термичке анализе, што захтева примену различитих временских интегратора за сваки од ова три различита нумеричка прорачуна и размену података између њих најмање једном на крају сваког од корака спровођења спрегнутог прорачуна. Ово доводи до значајног продужавања времена потребног за добијање решења и смањује ефикасност интеграције по времену глобалног спрегнутог нумеричког прорачуна, како су истакли *Culler* [49] и *Shengze* и др. [50].

Као један од најпознатијих је проблем интеракције оплоте ваздухоплова при лету на великим брзинама када долази до интензивног аеродинамичког загревања структуре, њеног деформисања услед термичког оптерећења, где се поставља



питање одређивања утицаја тако деформисане структуре на аеродинамичке карактеристике летелице и утицаја термичког оптерећења на радни век структуре. У својој дисертацији *Ostoich* [56] овај проблем поједностављује разматрањем две одвојене нумеричке симулације, преноса топлоте са струје ваздуха на недеформабилно тело при хиперсоничном струјању и интеракције флексибилног панела и хиперсоничне струје. У дисертацији *Culler* [57] и сажето у студији *Culler* и *McNamara* [58] су различити проблеми аеротермоеластичности решавани преко две одвојене спрегнуте нумеричке симулације проблема аеротермичких појава и појава аероеластичности. Прво је прорачуната расподела температура као резултат аеротермичке (*fluid-thermal*) нумеричке симулације. На основу ње је затим одређена нова геометрија термички оптерећене структуре. На крају је извршена нумеричка симулација аероеластичности (*fluid-structural*) за нову, деформисану геометрију структуре. Истраживани су утицаји изабраног модела преноса утицаја (једносмерни или двосмерни) и изабраних модела спрезања (слаби или јаки), тј. међусобног односа константи интеграције сваког од ова три одвојена прорачуна на тачност и стабилност добијеног решења и неки од закључака дати у [49, 58].

У области ваздухопловне и аерокосмотехнике се већ годинама, у оквиру различитих пројеката (*National Aerospace Plane – NASP* и његова друга фаза експериментална летелица X-30, како је детаљно дао *Augenstein* и др. [59]) ради на решавању проблема аеротермоеластичности. Конструктивни елементи летелица које се крећу брзинама вишеструко већим од брзине звука су локално изложени значајним притисним оптерећењима и топлотним флуксевима. Први пут су ове појаве регистроване 1967. год. у току развоја пројекта X-15, када су се током лета појавила значајна локална оштећења носећих пилона рамцет мотора. Једна од фаза програма *DARPA Falcon (Force Application and Launch from CONtinental United States)*, чији је циљ развој хиперсоничне крстареће летелице (*Hypersonic Cruise Vehicle HCV*), је била тестирање контролних и система термичке заштите на две опитне летелице (*Hypersonic Test Vehicle 2, HTV-2*) у лету при брзинама од 20 Mach. Обе летелице су оштећене приликом тест летова обављених током 2010-те и 2011-те услед неочекиваних околности повезаних са аеротермоеластичним

појавама у структури. Потпуно спрегнута структурално-аеродинамичко-термичка нумеричка анализа при брзинама на високим Маховим бројевима је веома прорачунски захтевна, посебно када је потребно симулирати понашање структуре у дужем временском периоду [56, 57].

Концепт просторно прилагођених напредних термичких структура (*spatially tailored advanced thermal structures* - STATs) је развијен са циљем да се превазиђу термомеханички проблеми који се јављају у ваздухопловству и другим областима инжењерства. Циљ је да се одговарајућом расподелом карактеристика материјала структуре оствари њен оптималан одговор на унето термичко оптерећење и тиме оствари оптимизација структуре у целини. Како су истакли *Birman* и др. [60] овај концепт може бити посебно користан у случајевима неуниформне расподеле температура у структури, што је случај у многим инжењерским апликацијама.

*FSI* се увеликој мери ослања на нумеричке симулације два различита физичка система: CFD са Ојлеровим приступом моделирању струјања флуида и CSM у Лагранжеовој формулацији чврстог тела. Оба могу бити заснована на различитим просторним дискретизационим шемама. У случају CFD то су МКЕ [44], метода коначних разлика [31, 40, 45] али најчешће МКЗ [31, 33, 36, 54]. Као најчешће коришћена дискретизациона метода у решавању CSM проблема сусреће се МКЕ [32, 36, 54, 55]. Поузданост добијених резултата зависи од усвојених претпоставки при моделовању и нивоа апроксимације симулираних физичких процеса. У многим практичним инжењерским проблемима је пожељно применити прорачунске технике које се заснивају на ограниченом скупу нумеричких и/или експерименталних података, а на основу којих је могуће добити поуздане тражене информације о посматраном проблему.

Прорачунске методе обраде података као што су неуронске мреже (*neural networks* - NN) и теорија фази логике (*fuzzy logic* - FL) се у великој мери и све више користе за предвиђање перформанси комплексних нелинеарних система са ограниченим бројем улазних података. У студији *Kortesis* и *Panagiotopoulos* [61] су применили неуронске мреже за моделирање нумеричких и експерименталних података у циљу решавања проблема структуралне анализе, где је је

---

идентификација параметра формулисана и решена као проблем учења NN. *Szewczyk* и *Noor* [62] су применили технику пертурбације заснована на *Padé* – овим апроксимантима у NN са циљем да се предвиде укупна енергија деформације и максимална померања укрућеног панела са отворима, као и да се предвиди понашање композитног панела након губитка стабилности. У циљу прорачуна фреквентног одговора напрелог материјала подвргнутог ударном оптерећењу *Liu* и др. [63] су користили уназад простирући (*back-propagation*) NN модел трениран са карактеристичним параметима добијеним CSD нумеричким прорачуном заснованом на МКЕ. Применом модела вештачке NN (*Artificial neural networks* - ANN) добијени су задовољавајући резултати у предвиђању одређених параметара флуидног тока. Тако су *Baghalian* и др. [64] применом модела ANN одредили брзинско поље у каналу савијеним под углом од  $90^\circ$ . Применом ANN *Erdik* и др. [65] су одредили максимално убрзање таласа на лукобрану, а *Yari* и др. [66] узгонску силу подморнице.

Технике ANN обезбеђују значајан ниво тачности улазно-излазног мапирања при моделовању нелинеарних система. Основна мана ових модела је да они представљају неку врсту "црне кутије" за корисника који нема могућност утицаја на извршавање одређених секвенци прорачуна. Системи закључивања базирани на теорији фази скупова [27] користе фази логику у форми "ако-онда" правила и препознатљивих лингвистичких термина за мапирање улазног у излазни простор. *Rao* и *Pratihari* [67] су развили и применили експертски систем заснован на фази логици (*fuzzy logic based expert system* - FLES) у циљу предвиђања резултата нумеричке анализе применом МКЕ проблема притиснутог гуменог цилиндра. Обзиром да перформансе једног ES зависе од квалитета базе знања (*knowledge base* - KB), посебни напори су уложени у развој адекватне KB коришћењем генетичких алгоритама. На основу резултата експерименталног истраживања модела авиона тестираног у субсоничном аеротунелу *Hossain* и др. [68] су применили FLES модел за предвиђање коефицијената узгона и отпора авиона.

У циљу дефинисања пројектних карактеристика посматране структуре, *Erdik* [70] је користио фази модел *Mamdani* типа [69] формиран на основу података

експерименталних истраживања на моделима умањене структуре и на моделу структуре у пуној величини. Експериментални подаци емисије угљендиоксида из једног мотора са унутрашњим сагоревањем су искоришћени за формирање КВ фази модела *Mamdani* типа у циљу предвиђања емисије са и без довода секундарног ваздуха у мотор [71].

Фази модели *Sugeno* типа [72] су формиран на претпоставци да су опис фази подпростора улазних величина и његове последице повезани линеарним улазно-излазним релацијама. Адаптивни неуро-фази систем (*Adaptive neuro-fuzzy inference system* - ANFIS) као специфична рутина тренирања фази система *Sugeno* типа је успешно коришћен за моделовање замора композитног ламината [73] при чему је неуро-фази модел тестиран експериментално одређеним подацима замора. На основу резултата мерења емисије угљендиоксида и одређивања фреквенције саобраћаја на терену, у циљу предвиђања емисије угљендиоксида су развијени један NN и један ANFIS модел [74].

Осим експерименталних, модели фази логике су у стању да процесирају и резултате нумеричких CSD, CFD [62, 63, 67] или *FSI* симулација [66, 75]. Овде ћемо истаћи студију *Saeed* и др. [75] у оквиру које је, на основу резултата нумеричког *FSI* прорачуна са једносмерним преносом утицаја, формирано више ANN и ANFIS модела за анализу радних услова и предвиђање развоја оштећења у лопатицама турбине. Фактори који утичу на процес формирања једног фази модела као што су формирање КВ, поступци тренинга и тестирања развијеног модела, били су предмет истраживања у радовима [62, 65-67, 74]. Као један од основних закључака студија [62, 65, 75] истакнуто је да поузданост резултата предвиђања фази модела у великој мери зависи од величине и репрезентативности скупа изабраних улазних података. Узрок овоме лежи у чињеници да нелинеарна карактеристика посматраног физичког процеса треба да буде што приближније описана скупом изабраних података [65, 67, 75]. Тачност предвиђања резултата добијених коришћењем модела фази логике, у односу на резултате експерименталних, аналитичких или нумерички истраживања истог проблема, се кретала од неколико процената [66, 68, 71, 73, 75] до више од 50% [65, 67, 70].

## 2 Основне полазне теоријске претпоставке

Основне једначине линеарне теорије термоеластичности успостављене на запремини диференцијално малих димензија под дејством запреминских сила  $\mathbf{F}^T = [F_x F_y F_z]$  у домену  $D$  и површинских сила  $\mathbf{p}^T = [p_x p_y p_z]$  на контури  $S_\sigma$  су:

- услови равнотеже спољашњих и унутрашњих сила (напона):

$$\sigma_{ij,j} + F_i = 0 \text{ и } \sigma_{ij} \lambda_j = p_i \text{ (једначина Cauchy-a)} \quad (2.1)$$

- конститутивне једначине за еластични материјал:

$$\sigma_{ij} = \delta_{ij} \lambda \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij} - \delta_{ij} (3\lambda + 2\mu) \alpha T \quad (2.2)$$

- веза између померања и деформација / ротација:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad \omega_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} - u_{j,i}) \quad (2.3)$$

- услови компатибилности деформација *Saint – Venant* – а:

$$\varepsilon_{il,jk} + \varepsilon_{jk,il} - \varepsilon_{ik,jl} - \varepsilon_{jl,ik} = 0 \quad (2.4)$$

- геометријски контурни услови:

$$u = \tilde{u} \quad (2.5)$$

где је:  $u_i$  – померање,  $\tilde{u}$  – вектор задатих померања,  $\sigma_{ij}$  – вектор напона,  $\varepsilon_{ij}$  – тензор деформација,  $\omega_{ij}$  – тензор ротација,  $\lambda, \mu$  – коефицијенти *Lame* – а,  $\alpha$  – коефицијент термичког ширења,  $T$  – температура.

### 2.1 Линеарна теорија танкозидних термички оптерећених плоча са различитим граничним условима ослањања

Укупна потенцијална енергија изотропне, термички оптерећене плоче константне дебљине, под претпоставком да се ради о танкој плочи тако да се нормални напон

$\sigma_z$  и смичуће деформације  $\gamma_{xz}$  и  $\gamma_{yz}$  могу занемарити, геометријских карактеристика као што је приказано на слици 2.1.1, је [19,20,76]:

$$\Pi = \Pi_d + \Pi_A + \Pi_M \quad (2.1.1)$$

где је енергија деформисања услед савијања еластичне плоче  $\Pi_d$ :

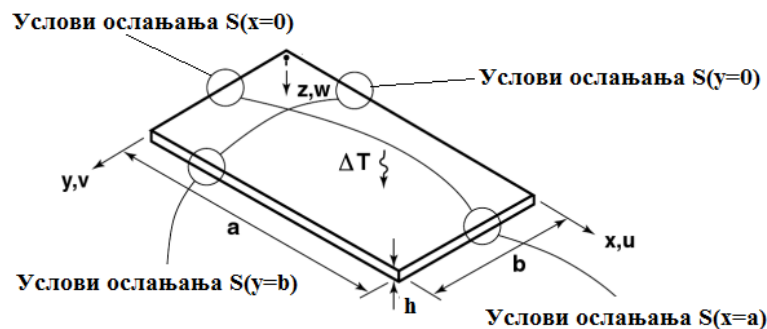
$$\Pi_d = \frac{1}{2} \iint_A D \left\{ \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy \quad (2.1.2)$$

промена у енергији деформације средње површи плоче током извијања  $\Pi_A$ :

$$\Pi_A = -\frac{1}{2} \iint_A \left[ N_x \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + N_y \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + 2N_{xy} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] dx dy \quad (2.1.3)$$

и енергија деформације услед термички индукованих момената  $\Pi_M$ :

$$\Pi_M = \iint_A \frac{M_T}{(1-\nu)} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) dx dy \quad (2.1.4)$$



**Слика 2.1.1** Геометријске карактеристике правоугаоне плоче и положај координатног система (слика преузета из [17])

У једначини (2.1.2) израз  $D = E \cdot h^3 / 12(1-\nu^2)$  представља крутост плоче на савијање.

Термичко оптерећење тежи да изазове промену димензија плоче. Оптерећење које се јавља у материјалу услед спречености да се шири/скупља у равни средње површи плоче, по јединици дужине, је:

$$N_T = \int_{-h/2}^{h/2} \alpha E (\Delta T) dz, \quad M_T = \int_{-h/2}^{h/2} \alpha E (\Delta T) z dz, \quad (2.1.5)$$

при чему коефицијент термичког ширења  $\alpha$  и модуло еластичности  $E$  у општем случају зависе од температуре,  $h$  је дебљина плоче,  $z$  – координата нормална на средњу површ,  $\Delta T = T - T_{\text{ref}}$  – разлика температура  $T$  [°C] посматране тачке у односу на референтну температуру  $T_{\text{ref}}$  [°C] при којој сматрамо да не постоје термички индуковане деформације и напони (у нашим случајевима за референтну вредност температуре узимамо  $T_{\text{ref}} = 0^\circ\text{C}$ ).

Применом *Ritz*-ове методе о минимуму потенцијалне енергије на јед. (2.1.1)

$$\frac{\partial \Pi}{\partial A_{ij}} = 0 \quad (2.1.6)$$

у односу на произвољан параметар

$$w(x, y) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_{ij} X_i(x) Y_j(y) \quad (2.1.7)$$

можемо одредити вредности температуре при којој долази до појаве губитка стабилности, за конкретне услове термичког оптерећења, конкретне граничне услове ослањања и адекватно изабране функције  $X_i$  и  $Y_j$  које задовољавају постављене граничне услове и на прикладан начин репрезентују облик извијања средње површ плоче. Коефицијенти  $A_{ij}$  серије функција (2.1.7) морају бити такви да обезбеђују минимум израза (2.1.6).

а) У случају плоче униформно загрејане по целој запремини на температуру  $T_{\text{kr}}$  не долази до појаве термички изазваних момената па је  $M_M = 0$  (раванско напрезање).

Ако претпоставимо граничне услове на ивицама плоче тако да су за  $x = 0, a$  спречена померања у оба правца средње површи  $u = v = 0$ , док су померања на ивицама  $y = 0, b$  слободна,  $u \neq 0, v \neq 0$ , онда је:

$$\Pi_A = \frac{N_T}{2(1-\nu)} \int_0^a \int_0^b \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx dy$$

па се применом *Ritz*-ове методе добија:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n D \int_0^a \int_0^b A_{ij} \left\{ \left( \frac{\partial^2 X_i}{\partial x^2} \right)^2 Y_j^2 + 2X_i Y_j \frac{\partial^2 X_i}{\partial x^2} \frac{\partial^2 Y_j}{\partial y^2} + X_i^2 \left( \frac{\partial^2 Y_j}{\partial y^2} \right)^2 + \frac{N_T}{(1-\nu)} \left( \frac{\partial X_i}{\partial x} \right)^2 Y_j^2 \right\} dx dy = 0$$

Под условом да су коефицијенти  $A_{ij} \neq 0$ , можемо изразити температуру при којој долази до губитка стабилности извијањем [19]:

$$T_{kr} = - \frac{h^2 \int_0^a \int_0^b \left[ Y_j^2 \left( \frac{\partial^2 X_i}{\partial x^2} \right)^2 + 2X_i Y_j \frac{\partial^2 X_i}{\partial x^2} \frac{\partial^2 Y_j}{\partial y^2} + X_i^2 \left( \frac{\partial^2 Y_j}{\partial y^2} \right)^2 \right] dx dy}{12(1+\nu) a \int_0^a \int_0^b \left( \frac{\partial X_i}{\partial x} \right)^2 Y_j^2 dx dy} \quad (2.1.8)$$

У случају плоче код које су све стране спречене да се померају у равни средње површи ( $u = v = 0$  за  $x = 0, a$  и  $y = 0, b$ ), термички индуковане силе у равни средње површи су  $N_x = N_y = -N_T/(1-\nu)$  и  $N_{xy} = 0$ , па применом *Ritz*-ове методе на једначину (2.1.1) и заменом (2.1.7) добијамо:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n D \int_0^a \int_0^b A_{ij} \left\{ \left( \frac{\partial^2 X_i}{\partial x^2} \right)^2 Y_j^2 + 2X_i Y_j \frac{\partial^2 X_i}{\partial x^2} \frac{\partial^2 Y_j}{\partial y^2} + X_i^2 \left( \frac{\partial^2 Y_j}{\partial y^2} \right)^2 + \frac{N_T}{(1-\nu)} \left[ \left( \frac{\partial X_i}{\partial x} \right)^2 Y_j^2 + X_i^2 \left( \frac{\partial Y_j}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy = 0$$

а за вредност критичне температуре:

$$T_{kr} = - \frac{h^2 \int_0^a \int_0^b \left[ Y_j^2 \left( \frac{\partial^2 X_i}{\partial x^2} \right)^2 + 2X_i Y_j \frac{\partial^2 X_i}{\partial x^2} \frac{\partial^2 Y_j}{\partial y^2} + X_i^2 \left( \frac{\partial^2 Y_j}{\partial y^2} \right)^2 \right] dx dy}{12(1+\nu) a \int_0^a \int_0^b \left[ \left( \frac{\partial X_i}{\partial x} \right)^2 Y_j^2 + \left( \frac{\partial Y_j}{\partial y} \right)^2 X_i^2 \right] dx dy} \quad (2.1.9)$$

б) У случају линеарне промене температуре  $\Delta T = T_{un} + zT_1$  кроз дебљину плоче  $h$  применом *Ritz*-ове методе на једначину (2.1.1) добијамо:



$$\frac{\partial \Pi}{\partial A_{ij}} = \frac{\partial \Pi_d}{\partial A_{ij}} + \frac{\partial \Pi_A}{\partial A_{ij}} + \frac{\Pi_M}{\partial A_{ij}} \quad (2.1.10)$$

Прегруписавањем и сређивањем једначине (2.1.10) на начин како је то урађено под а), под претпоставком да је функција померања облика (2.1.7), добијамо израз за критичну вредност температуре  $T_{0kr}$  при појави извијања за случај плоче код које су за  $x = 0, a$  спречена померања у оба правца средње површи  $u = v = 0$ , док су померања на ивицама  $y = 0, b$  слободна,  $u \neq 0, v \neq 0$ , који израз је идентичан десној страни једнакости (2.1.8). Аналогно, за случај плоче код које су померања свих страница у равни средње површи спречене ( $u = v = 0$  за  $x = 0, a$  и  $y = 0, b$ ) добијамо израз за  $T_{0kr}$  идентичан десној страни једнакости (2.1.9).

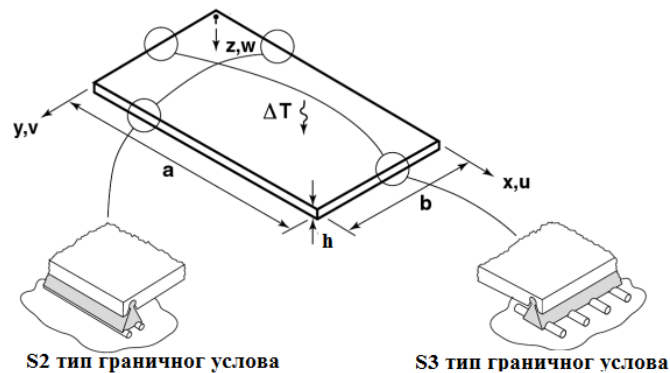
## 2.2 Аналитичка решења неких случајева термички оптерећених плоча

Термички изазвани напони се појављују услед постојања температурског градијента у неукрућеној структури или услед униформне или неунформне промене температуре у укрућеној структури. Термички изазвани напони могу бити довољно велики да изазову губитак стабилности структуралног елемената ако је спречено његово ширење услед пораста температуре. При томе су гранични услови ослањања од примарног значаја за тачно одређивање вредности оптерећења при којем долази до губитка стабилности и облика који структура заузима након губитка стабилности. Промена температуре неке структуре изазива промену карактеристика материјала структуре што негативно утиче на њену стабилност. Стога се са посебном пажњом одабира материјал структуре који је адекватан очекиваним термичким условима структуре, док се структура пројектује тако да буде у стању да издржи очекивано термичко оптерећење без губитка стабилности [17]. У овом поглављу су дати основни примери за термички униформно оптерећене плоче како по површини тако и по дебљини, при различитим условима ослањања. Решења ових и неких компликованијих случајева термички оптерећених плоча при различитим граничним условима ослањања дати су у [17, 76, 77, 85, 86]. Приказани примери су прорачунати на

основу геометријских карактеристика "хоризонталних" и "вертикалних" плоча које чине прву секцију канала.

### 2.2.1 Слободно ослоњена правоугаона плоча, спречених померања у $x$ правцу

Ако координантни систем поставимо као на слици 2.2.1 онда је: за  $x = 0, a \Rightarrow u = w = M_y = N_{xy} = 0, v \neq 0$  и за  $y = 0, b \Rightarrow N_x = w = M_x = u = 0, v \neq 0$ , тј. термичко оптерећење  $T_{kr}$  (по претпоставком не постојања термички индукованих напона при  $T_{ref} = 0^\circ\text{C}$ ) изазива силе али не и померања у  $x$ -правцу и изазива померања али не и силе у  $y$ -правцу, како је објашњено у *Jones* [17], *Timoshenko* [19].



**Слика 2.2.1** Слободно ослоњена правоугаона плоча са спреченим померањем у једном правцу подвргнута термичком оптерећењу  $T_{kr}$  (слика преузета из реф. 17)

Диференцијална једначина померања средње површи плоче, оптерећене само у равни средње површи, без дејства инерцијалних и површинских сила у правцу  $z$ -осе када се не јављају моменти савијања и чија средња површ остаје равна до извијања, дата је *Timoshenko* [19]:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{1}{D} \left( N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \quad (2.2.1)$$

Претпостављена функција померања средње површи у  $z$ -правцу облика

$$w = \tilde{w} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (2.2.2)$$

задовољава горњу једначину и граничне услове:

$$w|_{x=0,x=a} = 0, \quad w|_{y=0,y=b} = 0, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \Big|_{x=0,x=a} = 0, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \Big|_{y=0,y=b} = 0 \quad (2.2.3)$$

ако је задовољена следећа једнакост, тј. равнотежно стање пре појаве губитка стабилности је остварено ако је [17, 19]:

$$E\alpha h \frac{T_{kr}}{D} = \frac{\pi^2}{\left(\frac{m}{a}\right)^2} \left[ \left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 \right]^2. \quad (2.2.4)$$

Десна страна овог израза постиже минимум за  $n = 1$ , тако да се плоча извија у облик са једним полуталасом у правцу  $y$  осе. Оваје резултат је добијен под претпоставком да је померање средње површи плоче у правцу  $z$  осе мало и да се деформације у равни средње површи могу занемарити. Одавде добијамо вредност  $T_{kr}$  при којем долази до појаве бифуркације плоче, уз смену да је виткост  $r = a/b$ :

$$\kappa_T = \frac{12}{\pi^2} (1 - \nu^2) \alpha T_{kr} \left(\frac{b}{h}\right)^2 = \frac{1}{m^2 r^2} (m^2 + n^2 r^2)^2 \quad (2.2.5)$$

$$T_{kr} = \frac{D\pi^2}{\alpha E h m^2 a^2} (m^2 + n^2 r^2)^2 \quad (2.2.6)$$

$\Rightarrow$  за  $n = 1$ , за плоче геометријских карактеристика као што су "хоризонталне" плоче секције 1 са  $r = a/b = 1,524 > \sqrt{2}$ ,  $\Rightarrow m = 2$ , и вредност термичког коефицијента  $\alpha = 19 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  добијамо  $T_{kr}^{1h} = 13,6^\circ\text{C}$ . За "вертикалне" плоче исте секције, за које је однос  $r = a/b = 1.875/0.26 = 7,21$ , мод при којем се дешава извијање на најнижој температури је формиран од седам полуталаса у  $x$ -правцу тј.  $m = 7$ ,  $\Rightarrow T_{kr}^{1v} = 279,9^\circ\text{C}$ . Добијени резултат је очекиван јер су "вертикалне" плоче секције 1, обзиром на њихове геометријске карактеристике и положај у простору, круће и отпорније на извијање услед термичког оптерећења него "хоризонталне" плоче. Даље се може закључити да су "хоризонталне" плоче те које иницирају и одређују облик деформисања целе структуре. Ово важи тим пре с обзиром на то

да спољашње оптерећење које делује на плоче (гравитационо, притисно) изазива савијање "хоризонталних" плоча.

Температура при којој се у материјалу плоче остварују напони на граници еластичности је  $T_{kr}^{tec} = \sigma_y / E\alpha = 230 \cdot 10^6 / (203 \cdot 10^9 \cdot 19 \cdot 10^{-6}) = 59,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Овај резултат указује на то да би у случају "вертикалних" слободно ослоњених плоча спречених померања у  $x$ -правцу, пре саме појаве извијања дошло до појаве трајних деформација у материјалу.

### 2.2.2 Слободно ослоњена правоугаона плоча спречених померања у оба правца

У случају слободно ослоњене правоугаоне плоче спречених померања у оба правца  $x$  и  $y$  добијамо:  $x = 0, a \Rightarrow u = v = w = M_x = 0$  и за  $y = 0, b \Rightarrow u = v = w = M_y = 0$ ), узевши горе претпостављену функцију померања средње површи плоче у правцу  $z$  - осе (2.2.2), у Jones [17] је дата хомогена диференцијална једначина (2.2.1) која описује стање плоче пре појаве извијања и гранични услови (2.2.3) су задовољени ако је испуњен услов:

$$k_T = \frac{12(1+\nu)}{\pi^2} \alpha T_{kr} \left(\frac{b}{h}\right)^2 = m^2 \left(\frac{b}{a}\right)^2 + n^2 \quad (2.2.7)$$

Одавде се добија вредност температуре при којем се појављује извијање:

$$T_{kr} = \frac{D\pi^2(1-\nu)}{E\lambda h a^2} (m^2 + n^2 r^2) \quad (2.2.8)$$

Најнижи мод појављује се при  $m = 1, n = 1$ , па би аналогно претходном примеру, било  $T_{kr}^{1h} = 3,2^\circ\text{C}$ ,  $T_{kr}^{1v} = 50,6^\circ\text{C}$ , а вредност температуре при којој долази до појаве течења у материјалу је  $T_{kr}^{tec} = \frac{1-\nu}{E} \frac{\sigma_y}{\alpha} = 42,4^\circ\text{C}$ , дакле плоча код које је спречено ширење у оба правца губи стабилност и пластичне деформације се појављују при нижим вредностима температуре него у случају датом у пог. 2.2.1.

2.2.3 Укљештена плоча са спреченим померањима на ивицама  $x = 0, a$  и слободно ослоњена са дозвољеним померањима на  $y = 0, b$

Гранични услови ослањања имају облик  $w|_{x=0, x=a} = 0$ ,  $w|_{y=0, y=b} = 0$ ,  $\frac{\partial w}{\partial x}|_{x=0, x=a} = 0$ ,

$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}|_{x=0, x=a} = 0$ . *Abdul-Majeed* и др. [76] су за померања средње површи у правцу  $z$ -

осе узели следеће функције које задовољавају постављене граничне услове:

$$X_i = \sin \mu_i x - \sinh \mu_i x - \eta_i (\cos \mu_i x - \cosh \mu_i x), \quad Y_j = \sin \mu_j y \quad (2.2.9)$$

где је:  $\eta_i = \frac{\sin \mu_i a - \sinh \mu_i a}{(\cos \mu_i a - \cosh \mu_i a)}$ ,  $\mu_i = \frac{m\pi}{a}$ ,  $\mu_j = \frac{n\pi}{b}$ . Заменом у јед. (2.1.8) добија

се израз за критичну вредност температуре при којој долази до извијања:

$$T_{kr} = \frac{h^2 (\beta_1^4 + 2r^2 \beta_2 + r^4 \beta_3^4)}{12(1+\nu)a^2 \beta_1^2} \quad (2.2.10)$$

У горњој једначини су:  $\beta_1 = 4,73$ ,  $\beta_2 = 12,3j^2\pi^2$ ,  $\beta_3 = j\pi$ , за  $i = 1$ ,  $j = 1, 2, 3, \dots$

$$\beta_1 = \left( j + \frac{\pi}{2} \right), \quad \beta_2 = \beta_1(\beta_1 - 2)j^2\pi^2, \quad \beta_3 = j\pi, \quad \text{за } i = 2, 3, 4, \dots, \quad j = 1, 2, 3, \dots$$

Из услова минимума термички индуковане силе  $N_t$  у равни средње површи у

правцу  $x$ -осе добија се  $r_{\min} = \frac{\beta_1}{\beta_3}$ , што за случај формирања једног полуталаса ( $j =$

1) у правцу  $y$ -осе даје  $r_{\min} = 1,5056$ . За плоче са геометријским карактеристикама "хоризонталних" и "вертикалних" плоча секције 1 добијамо  $T_{kr}^{1h} = 10,1^\circ\text{C}$  и  $T_{kr}^{1v} = 130,0^\circ\text{C}$  при формирању мода са 2 и 6 полуталаса у правцу  $x$ -осе респективно.

2.2.4 Правоугаона плоча укљештена по свим ивицама и спречених померања

За  $x=0, a$  и  $y=0, b$  гранични услови ослањања имају облик  $w|_{x=0, x=a} = 0$ ,  $w|_{y=0, y=b} = 0$ ,

$\frac{\partial w}{\partial x}|_{x=0, x=a} = 0$ ,  $\frac{\partial w}{\partial y}|_{y=0, y=b} = 0$ . За померања средње површи *Abdul-Majeed* и др. [76]

су претпоставили следеће трансцедентне функције које задовољавају постављене граничне услове:

$$\begin{aligned} X_i &= \sin \mu_i x - \sinh \mu_i x - \eta_i (\cos \mu_i x - \cosh \mu_i x), \\ Y_j &= \sin \mu_j y - \sinh \mu_j y - \eta_j (\cos \mu_j y - \cosh \mu_j y), \end{aligned} \quad (2.2.11)$$

где је:  $\eta_i = \frac{\sin \mu_i a - \sinh \mu_i a}{(\cos \mu_i a - \cosh \mu_i a)}$ ,  $\eta_j = \frac{\sin \mu_j b - \sinh \mu_j b}{(\cos \mu_j b - \cosh \mu_j b)}$ ,  $\mu_i = \frac{m\pi}{a}$ ,  $\mu_j = \frac{n\pi}{b}$ .

Заменом у јед. (2.1.9) добија се:

$$T_{kr} = \frac{h^2 (\alpha_1^4 + 2r^2 \alpha_2 + r^4 \alpha_3^4)}{12(1+\nu)a^2 \alpha_1^2} \quad (2.2.12)$$

У горњој једначини су:  $\alpha_1 = 4,73$ ,  $\alpha_2 = 151,3$ ,  $\alpha_3 = 4,73$ , за  $i = 1$ ,  $j = 1$ ,

$$\alpha_1 = 4,73, \alpha_2 = 12,3 \cdot \alpha_3 (\alpha_3 - 2), \alpha_3 = (j + 0,5)\pi, \text{ за } i = 1, j = 2, 3 \dots$$

$$\alpha_1 = (i + 0,5)\pi, \alpha_2 = 12,3 \cdot \alpha_1 (\alpha_1 - 2), \alpha_3 = 4,73, \text{ за } i = 2, 3 \dots, j = 1,$$

$$\alpha_1 = (i + 0,5)\pi, \alpha_2 = \alpha_1 (\alpha_1 - 2) \alpha_3 (\alpha_3 - 2), \alpha_3 = (j + 0,5)\pi, \text{ за } i = 2, 3 \dots, j = 2, 3, \dots$$

За плоче са геометријским карактеристикама "хоризонталних" и "вертикалних" плоча секције 1 добијамо  $T_{kr}^{1h} = 14,3^\circ\text{C}$  и  $T_{kr}^{1v} = 340,0^\circ\text{C}$  при формирању мода са 2 и 10 полуталаса у правцу  $x$ -осе респективно те са једним полуталасом у правцу  $y$ -осе.

### 2.3 Основне једначине деформације танке љуске и плоче

У техничкој теорији танких љуски деформација љуске као тела се описује помоћу тангенцијалне деформације средње површи и промене кривина средње површи љуске, односно помоћу тензора мембранске деформације и тензора деформације савијања. У општем случају тензор мембранске деформације  $\varepsilon_{\alpha\beta}$  и тензор деформације савијања  $\kappa_{\alpha\beta}$  дати су следећим изразима [17,22]:

$$\varepsilon_{\alpha\beta} = e_{\alpha\beta} + \frac{1}{2} a^{\lambda\mu} (e_{\lambda\alpha} + \omega_{\lambda\alpha})(e_{\mu\beta} + \omega_{\mu\beta}) + \frac{1}{2} (\omega_{3\alpha,\beta} + \omega_{3\alpha})(e_{3\beta} + \omega_{3\beta}) \quad (2.3.1)$$

$$\kappa_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} (\omega_{3\alpha,\beta} + \omega_{3\beta,\alpha}) + \frac{1}{2} [e_{\gamma\beta} + \omega_{\gamma\beta} b_{\alpha}^{\gamma} + (e_{\gamma\alpha} + \omega_{\gamma\alpha}) b_{\beta}^{\gamma}] - (b_{\alpha}^{\gamma} \varepsilon_{\alpha\beta} + b_{\beta}^{\gamma} \varepsilon_{\lambda\alpha})$$

у којима индекси обележени грчким словима узимају вредности 1 и 2 и припадају координатним линијама у средњој површи љуске, док се индекс 3 односи на нормалу средње површи љуске. Са  $a_{\alpha\beta}$  је обележен метрички тензор средње површи, са  $b_{\alpha}^{\beta}$  тензор кривина средње површи љуске, линеаризовани тензор деформације је  $e_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} (u_{\alpha,\beta} + u_{\beta,\alpha})$ , а линеаризовани тензор ротације  $\omega_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} (u_{\alpha,\beta} - u_{\beta,\alpha})$ . За танке љуске можемо сматрати да је  $e_{\alpha\beta} \ll \omega_{\alpha\beta}$ , тако да је могуће увести претпоставку о истом реду малих величина  $e_{\alpha\beta}$  и  $\omega_{\alpha\beta}^2$ . Сем тога, ротација око нормале  $\omega_{12}$  је знатно мања од ротације у тангенцијалној равни  $\omega_{13}$ , па (2.3.1.) даје за компоненте тангенцијалне деформације и деформације савијања:

$$\varepsilon_{\alpha\beta} = e_{\alpha\beta} + \frac{1}{2} \omega_{3\alpha} \omega_{3\beta}, \quad \kappa_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} (\omega_{3,\alpha\beta} + \omega_{3,\beta\alpha}) = -w_{,\alpha\beta} - \frac{1}{2} [(u_{\gamma} b_{\alpha}^{\gamma})_{,\beta} + (u_{\delta} b_{\beta}^{\delta})_{,\alpha}] \quad (2.3.2)$$

Као специјалан случај, за танке плоче се добија:

$$\varepsilon_x = u_{,x} + \frac{1}{2} (w_x)^2, \quad \varepsilon_y = u_{,y} + \frac{1}{2} (w_y)^2, \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{2} (u_{,y} + v_{,x}) + \frac{1}{2} w_x w_y \quad (2.3.3)$$

$$\kappa_x = -w_{,xx}, \quad \kappa_y = -w_{,yy}, \quad \tau = -w_{,xy} \quad (2.3.4)$$

где су  $x$  и  $y$  правоугле координате у средњој површи плоче.

## 2.4 Варијациона формулација

Функционал потенцијалне енергије :

$$\Pi = A + U \quad (2.4.1)$$

где је  $A = \frac{1}{2} \int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV$  - енергија деформације,  $U = - \int_V F_i u_i dV - \int_{S_\sigma} p_i u_i dS$  -

потенцијал конзервативних сила. У изразу за енергију деформације,  $\sigma_{ij}$  је *Cauchy*-јев тензор напона, а  $\varepsilon_{ij}$  је *Green-Lagrange*-ов тензор деформација. Ако се тензор деформација прикаже као збир линеарног и нелинеарног дела у облику:

$$\varepsilon_{ij} = e_{ij} + \eta_{ij} \quad \text{где су: } e_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad \eta_{ij} = \frac{1}{2}u_{k,i}u_{k,j} \quad (2.4.2)$$

а тензор напона изрази преко тензора деформација:

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (2.4.3)$$

где су  $D_{ijkl}$  – коефицијенти еластичности, израз за енергију деформације постаје:

$$A = \frac{1}{2} \int_V D_{ijkl} (e_{ij} e_{kl} + e_{ij} \eta_{kl} + e_{kl} \eta_{ij} + \eta_{ij} \eta_{kl}) \quad (2.4.4)$$

Добијена једначина представља општи израз за енергију деформације у геометријски нелинеарној анализи. Ако формирамо вектор напона  $\sigma$ , матрицу коефицијената еластичности  $D$  ( $D_{ij}$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, 6$ ) и сваку од шест компоненти вектора деформације представимо као збир линеарног и нелинеарног дела  $\varepsilon_i = \varepsilon_{Li} + \varepsilon_{Ni}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 6$ , добијамо израз за функционал потенцијалне енергије:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V (\varepsilon_L^T D \varepsilon_L + \varepsilon_L^T D \varepsilon_N + \varepsilon_N^T D \varepsilon_L + \varepsilon_N^T D \varepsilon_N) dV - \int_V F^T n dV - \int_{S_\sigma} p^T u dS \quad (2.4.5)$$

## 2.5 Основе теорије пластичности

Поред конститутивних веза којима се описује понашање материјала у домену еластичности, за описивање еластопластичног понашања материјала потребно је још дефинисати услов течења (*a yield conditions*), којим се дефинише напонско стање у тренутку почетка пластичних деформација, закон течења (*a flow rule*), којим се дефинише веза инкременталних деформација и напона за стање након



појаве пластичних деформација и закон ојачања (*a hardening rule*), којим се дефинише начин на који се услов платичности модификује у току процеса течења.

Општи облик везе напона и деформација стање пре појаве пластичних деформација дат је изразом (2.4.5). За изотропне материјале, ако са  $\lambda$  и  $\mu$  означимо Lamé-ове параметре а  $\delta_{ij}$  - симбол *Kronecker*-а, коефицијенти еластичности су:

$$D_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (2.5.1)$$

Услов течења којим се дефинише ниво напона при којем почињу пластичне деформације се у општем случају изражава на следећи начин:

$$F(\sigma_{ij}) = k \quad (2.5.2)$$

где је  $F$  нека функција напона а  $k$  параметар који се одређује експерименталним путем. У случају изентропских материјала услов течења има облик  $F(I_1, I_2, I_3)$ , где су инваријанте тензора напона  $\sigma_{ij}$ :

$$I_1 = \sigma_{ii}, \quad I_2 = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij}, \quad I_3 = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \sigma_{jk} \sigma_{kl} \quad (2.5.3)$$

*Von Misses*-ов услов течења претпоставља да до појаве течења наступа када друга инваријанта тензора напона достигне одређену вредност:

$$F(\sigma_{ij}) = I_2' = k^2 \quad (2.5.4)$$

Услов пластичности се може приказати на следећи начин:

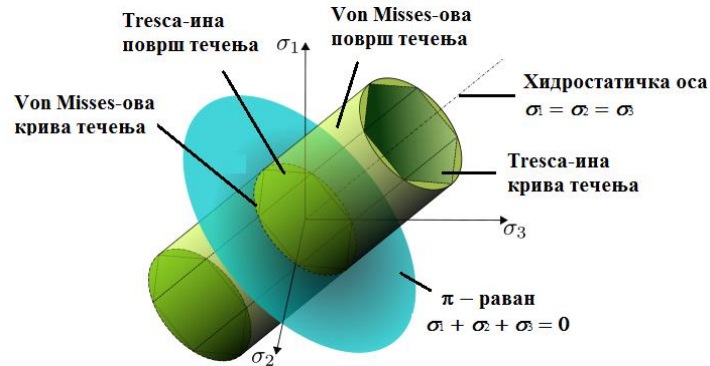
$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 6k^2 \quad (2.5.5)$$

али и преко ефективног односно еквивалентног напона:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2)]} \quad (2.5.6)$$

На основу разматрања о енергији деформације *Hencky* је показао да *von Misses*-ов услов течења значи да пластично течење наступа када енергија промене облика достигне критичну вредност. У тродимензионалном напонском простору површ

течења дата једначином (2.5.5) представља цилиндар чија је пројекција на  $\Pi$  раван круг полупречника  $\sqrt{2}k$  (слика 2.5.1).

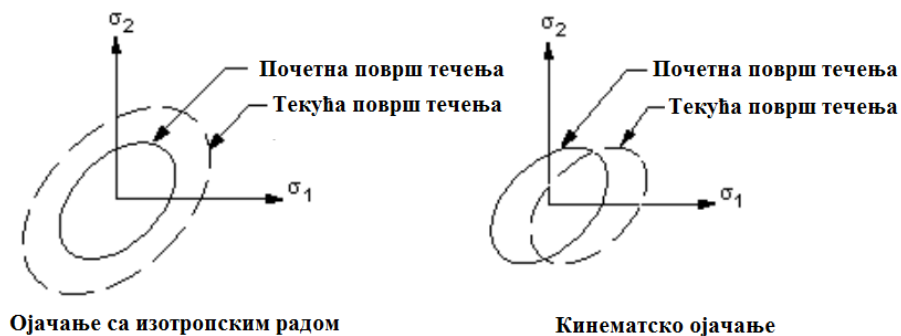


Слика 2.5.1. Геометријска интерпретација услова течења

Закон течења је дефинисан помоћу градијента пластичног потенцијала, где је  $d\lambda$  – коефицијент пропорционалности који одређује ниво пластичног деформисања,  $Q$  – потенцијал пластичности, који одређује правац пластичног деформисања:

$$d\varepsilon_{ij}^{(p)} = d\lambda \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2.5.7)$$

У случају идеално пластичних материјала није могуће даље повећање напона преко нивоа који одговара иницијалној површи течења.



Слика 2.5.2 Модели ојачања материјала, лево – изотропно, десно – кинематско

За развој пластичних деформација у реалном материјалу неопходно је повећати оптерећење изнад нивоа који доводи до иницијалних пластичних деформација. Ова особина се назива ојачање материјала, приказано следећим једначинама:

$$F(\sigma_{ij}) = K(k) \text{ или } dF(\sigma) = \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} \quad (2.5.8)$$

где је  $K$  – параметар ојачања. У случају кинематског ојачања, при повећању оптерећења долази до translације иницијалне површи течења као круте фигуре уз задржавање првобитног облика. У случају изотропног ојачања, при повећању оптерећења иницијална површ се униформно шири, остајући при томе сама себи слична (слика 2.5.2).

## 2.6 Основне једначине струјања флуида

Једначине одржања масе, количине кретања и укупне енергије струјања Њутновског флуида су облика [25, 26]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (2.6.1)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{S}_M \quad (2.6.2)$$

$$\frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\tau}) + \mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M + \mathbf{S}_E \quad (2.6.3)$$

где је тензор напона  $\boldsymbol{\tau}$  повезан са нивоом деформисања флуидног делића преко:

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left( \nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \mathbf{U} \right) \quad (2.6.4)$$

где је  $h_{tot} = h + \mathbf{U}^2/2$  тотална енталпија,  $h(T, p)$  – статичка енталпија,  $\mathbf{U}$  – вектор брзине,  $\rho$  – густина,  $p$  – притисак,  $\lambda$  – термичка проводљивост и  $\mu$  – динамичка вискозност флуида,  $\delta$  – *Kronecker* симбол. Члан  $\nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\tau})$  је рад вискозних напона, а  $\mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M$  рад спољашег извора количине кретања, који занемарујемо у овом раду. Ознаке  $\nabla p$ ,  $\nabla \mathbf{U}$  и  $\mathbf{U} \otimes \mathbf{U}$  означавају градијент (притиска), дивергенцију (вектора брзине) и тензорски производ (вектора брзине) респективно. Величина  $\mathbf{S}_E$  представља запремински извор топлоте, у нашем случају такође занемарен.

### 3 Коришћени модели дискретизације континуума

#### 3.1 Матрични облик једначине равнотеже коначног елемента плоче

Полазећи од израза (2.3.2) и везе компонената деформације у еквидистантној површи и компонената деформације у средњој површи плоче:

$$\varepsilon_{\alpha}^* = \varepsilon_{\alpha} + z\kappa_{\alpha}, \quad \varepsilon_{\beta}^* = \varepsilon_{\beta} + z\kappa_{\beta}, \quad \omega^* = \omega + 2z\tau \quad (3.1.1)$$

где су  $\varepsilon_{\alpha}$ ,  $\varepsilon_{\beta}$  и  $\omega$  компоненте тангенцијалне деформације, а  $\kappa_{\alpha}$ ,  $\kappa_{\beta}$  и  $\tau$  су компоненте деформације савијања љуске чији је положај одређен базним триједром  $\mathbf{e}_{\alpha}$ ,  $\mathbf{e}_{\beta}$  и  $\mathbf{n}$ , и са компонентама  $u$ ,  $v$  и  $w$  вектора померања  $\mathbf{u}$ , могу се добити компоненте деформације у произвољној тачки која је на одстојању  $z$  од средње равни плоче, као функције компонената померања тачака у средњој равни плоче, на следећи начин:

$$\varepsilon_x = u_{0,x} + \frac{1}{2}w_x^2 - zw_{xx}, \quad \varepsilon_y = v_{0,x} + \frac{1}{2}w_y^2 - zw_{yy}, \quad \omega = \gamma_{xy} + u_{0,y} + v_{0,x} + w_x w_y - 2zw_{xy} \quad (3.1.2)$$

Увођењем векторске нотације, са  $N_u$   $N_w$  представимо матрицу и вектор интерполационих функција, са  $\mathbf{q}_u$  и  $\mathbf{q}_w$  векторе одговарајућих параметара померања у чворовима за описивање равног стања и савијања, за енергију деформације једног коначног елемента плоче, при чему индекси  $m$  и  $b$  означавају мембрански удео односно удео савијања, након сређивања се добија:

$$A_m = \frac{1}{2}q_u^T k_{uu} q_u + \frac{1}{2}q_w^T \left( \int_F B_{w2}^T W^T G_1 W B_{w2} dF \right) q_w + \frac{1}{2}q_w^T \left( \int_F B_{w2}^T W^T G_2 W B_{w2} dF \right) q_u$$

$$A_{mb} = \frac{1}{2}q_u^T k_{uw} + \frac{1}{2}q_w^T \left( \int_F B_{w2}^T W^T G_1 W B_{w2} dF \right) q_w, \quad A_b = \frac{1}{2}q_u^T k_{uu} q_{uu} \quad (3.1.3)$$

где су:

$$k_{uu} = \int_V B_u^T D_{11} B_u dF, \quad k_{uw} = \int_V B_u^T D_{12} B_{w3} dF, \quad k_{ww} = \int_V B_{w3}^T D_{12} B_{w3} dF, \quad G_1 = B_{w1}^T D_{11} B_{w1},$$

$$G_2 = B_{w1}^T D_{11} B_u, \quad G_3 = B_{w1}^T D_{12} B_{w3} \quad (3.1.4)$$

Чланови под интегралом у изразу (3.1.3) су последице нелинеарности веза између деформације и померања. Нелинеарни део у изразу за  $A_{mb}$  зависи од параметара мембранске деформације, док у изразу за  $A_m$  зависи од параметара мембранске и деформације савијања. Рад  $A_S$  спољашњег оптерећења  $p_x, p_y, p_z$  подељеног по површини плоче и линијска оптерећења  $p_{nx}, p_{ny}, p_{nz}$ , односно моменти  $m_n, m_{nt}$  на делу контуре  $S$ , једнак је потенцијалу спољашњих сила  $A_S = -U$ , тотална потенцијална енергија као збир енергије деформације и потенцијала спољашњих сила постаје:

$$\Pi = A_m + A_{mb} + A_b + U \quad (3.1.5)$$

Применом варијационог става о стационарности потенцијалне енергије  $\delta\Pi = 0$ , добијају се једначине равнотеже у матричном облику:

$$kq = Q \text{ или на други начин као: } \begin{bmatrix} k_{uu} & k_{uw} \\ k_{wu} & k_{ww} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_u \\ q_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_u \\ Q_w \end{bmatrix} \quad (3.1.6)$$

Услови равнотеже (3.1.5) и (3.1.6) представљају систем нелинеарних алгебарских једначина у којем матрица  $k$  има значење тангентне матрице крутости.

### 3.2 Одређивање својствених вредности система коначних елемената

#### *Својствене вибрације система коначних елемената*

Проблем одређивања својствених вредности и вектора за случај вибрација без пригушења система коначних елемената се може приказати у облику:

$$[K]\{\phi_i\} = \lambda_i [M]\{\phi_i\} \quad (3.2.1)$$

где је  $[K]$  - матрица крутости система,  $\{\phi_i\}$  - својствени вектор,  $\lambda_i$  - својствена вредност,  $[M]$  - матрица маса система. У случају модалне анализе,  $[K]$  обухвата

геометријску матрицу крутости  $[S]$ . У случају бифуркационе анализе стабилности матрица маса  $[M]$  се замењује са геометријском матрицом крутости  $[S]$ , а  $\{\phi_i\}$  је  $i$ -ти својствени вектор померања. Оба проблема се свде на стандардни облик проблема својствених вредности, који се може приказати матричном једначином

$$([A] - \lambda[I])[Y] = 0 \quad (3.2.2)$$

где је  $[A]$  квадратна симетрична матрица,  $[I]$  јединична матрица  $n$ -тог реда,  $\lambda_i$  ( $i=1,2 \dots n$ ) својствене вредности матрице  $[A]$ . Пошто се одређивање својствених вредности проблема облика (3.2.2) сматра стандардним, неопходно је извршити трансформацију израза (3.2.1) на облик (3.2.2).

За одређивање својствених вредности и својствених вектора дискретних структура које се добијају применом МКЕ, у оквиру софтверског пакета ANSYS постоји неколико поступака [24] чија ефикасност у великој мери зависи од врсте проблема односно од величина матрица  $[K]$  и  $[M]$ , ширине трака ових матрица, као и од тога да ли је потребно да се одреде све својствене вредности или само одређен број најнижих вредности [22,23]. У овом раду су коришћена следећа два алгоритма за издвајање својствених вредности:

а) метода блокова вектора (*Block Lanczos*) развијеног за проблеме са великим ретким симетричним матрицама, заснован на методи спектралне трансформације *Ericsson*-а и *Ruhe*-а са применом *Lanczos*-ове рекурзије на блоковима вектора уместо на једном вектору [96].

б) метода подпростора (*subspace*) је примењив за проблеме са симетричним системским матрицама, при чему се једначина (3.2.1) користи у облику који се добије када се потраже изводи по  $\lambda_i$ :

$$-[M]\{\phi_i\} = \{0\} \quad (3.2.3)$$

Применом *Krylov*-ог сета ортогоналних вектора у облику  $[Q] = [\{q_1\}\{q_2\} \dots \{q_m\}]$  проблем (3.2.1) се упрошћава на облик:

$$[K^*]\{y_i\} = \mu_i [M^*]\{y_i\} \quad (3.2.4)$$

при чему је  $[K^*] = [Q^T][K][Q]$ ,  $[M^*] = [Q^T][M][Q]$ . Својствене вредности  $\mu_i$  проблема (3.2.4) се добијају коришћењем директне процедуре издвајања својствених вредности као приближне, које конвергирају ка вредностима  $\lambda_i$  са повећањем величине подпростора  $m$ . Предност овог метода у односу на метод *Block Lanczos* – а је у томе што обе матрице и  $[K]$  и  $[S]$  могу бити неодређене истовремено.

#### *Бифуркациона стабилност система коначних елемената*

Проблем бифуркационе стабилности система коначних елемената заснован је на теорији линеарне стабилности. Ако се у изразу за енергију деформације у јед. (2.4.4) занемари члан  $e_{ij}\eta_{kl}$ , добијамо:

$$A = \frac{1}{2} \int_V [D_{ijkl} e_{ij} e_{kl} + D_{ijkl} (e_{kl} + \eta_{kl}) \eta_{ij}] dV \quad (3.2.5)$$

Водећи рачуна да је  $\sigma_{ij} = D_{ijkl} (e_{kl} + \eta_{kl})$ , јед. (3.2.5) у матричном облику постаје:

$$A = \frac{1}{2} \{q\}^T ([k_0] + [k_g]) \{q\} \quad (3.2.6)$$

где су  $[k_0]$  - матрица крутости,  $[k_g]$  - геометријска матрица крутости,  $\{q\}$  – вектор померања. Ако за нови облик геометријске матрице крутости узмемо  $q^T k_g q = \int_V \sigma_{ij} \eta_{ij} dV$ , који се понекад зове и матрица почетних или иницијалних

напона, за потенцијалну енергију система коначних елемената добијамо:

$$\Pi = \frac{1}{2} q^{*T} (K_0^* + K_g^*) q^* - q^T Q^* \quad (3.2.7)$$

Ако се претпостави да је распоред напона у телу квалитативно увек исти и независан од интензитета оптерећења, геометријска матрица крутости се може одредити без претходног одређивања померања односно напона. Под

претпоставком да су напони пропорционални оптерећењу са фактором  $\lambda$ , двоструком варијацијом израза за потенцијалну енергију система коначних елемената и водећи рачуна да је при  $\delta^2\Pi = 0$  равнотежа неутрална, проблем се своди на решавање стандардног проблема својствених вредности, јед. (3.2.2). Критичне вредности тј. бифуркација (линеарни проблем) за различите случајеве оптерећења и граничне услове ослањања љуски и плоча дате су у [17, 22, 76].

### 3.3 Основне карактеристике нумеричког прорачуна струјања флуида

Интеграција једначина (2.6.1) – (2.6.3) се врши у свакој контролној запремини, а применом *Gauss*–ове теореме се интегралчење по запремини своди на интегралчење по површини. У случају да се контролна запремина не деформише током времена, интегрални облик ових једначина за дводимензионални проблем је:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_S \rho U_j dn_j = 0 \quad (3.3.1)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho U_i dV + \int_S \rho U_j U_i dn_j = - \int_S p dn_j + \int_S \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) dn_j + \int_V S_{U_i} dV \quad (3.3.2)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \varphi dV + \int_S \rho U_j \varphi dn_j = \int_S \Gamma_{eff} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) dn_j + \int_V S_\varphi dV \quad (3.3.3)$$

где је  $n_j$  компонента вектора нормале на површину  $S$  запремине  $V$ ,  $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$  је ефективна,  $\mu$  динамичка и  $\mu_t$  турбулентна вискозност,  $\Gamma_{eff}$  дифузивност скалара  $\varphi$ . Запремински интегралчи представљају изворе а површински суму флуксева посматране величине. Запремински интегралчи се дискретизују у оквиру сваког сектора елемента и додају контролној запремини којој сектор припада. Површински интегралчи се дискретизују у тачкама интеграције (*ipn*) које се налазе у центру сваке површине елемента и додају се суседној контролној запремини, чиме је локално обезбеђена конзервативност површинских интеграла. Струјање



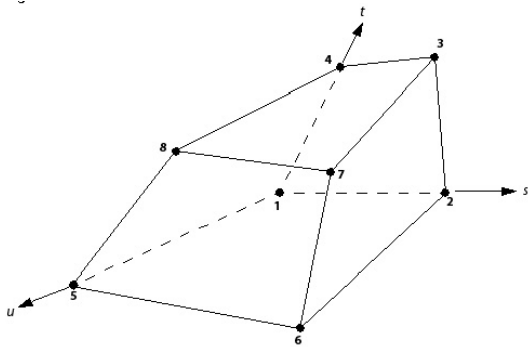
флуида је представљено конзервативним формама Рејнолдс усредњених Навије-Стоксових једначина за нестишљиво нестационарно струјање и једначинама одржања масе Њутновског флуида. Након дискретизације, интегралне једначине за дводимензионални проблем имају облик:

$$V \left( \frac{\rho - \rho^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} = 0 \quad (3.3.4)$$

$$V \left( \frac{\rho U_i - \rho^0 U_i^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} (U_i)_{ip} = \sum_{ip} (p dn_i)_{ip} + \sum_{ip} \left( \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \Delta n_j \right)_{ip} + \overline{S_{U_i}} V \quad (3.3.5)$$

$$V \left( \frac{\rho \varphi - \rho^0 \varphi^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} \varphi_{ip} = \sum_{ip} \left( \Gamma_{eff} \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \Delta n_j \right)_{ip} + \overline{S_\varphi} V \quad (3.3.6)$$

У горњим једначинама је  $\dot{m}_{ip} = (\rho U_j \Delta n_j)$ ,  $V$  је контролна запремина,  $\Delta t$  временски корак,  $\Delta n_j$  компонента вектора нормале на површину, индекс  $ip$  означава одређивање посматраног израза у тачки интеграције.

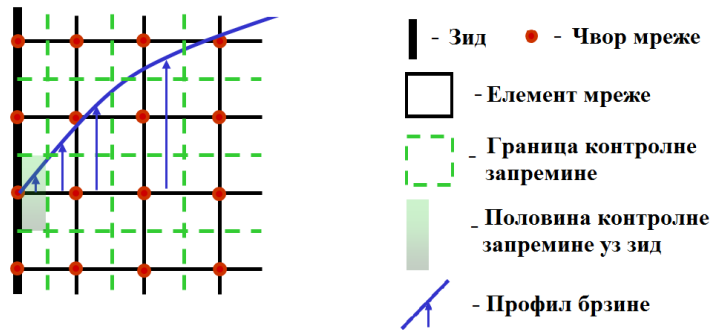


$$\begin{aligned} N_1(s, t, u) &= (1-s)(1-t)(1-u) \\ N_2(s, t, u) &= s(1-t)(1-u) \\ N_3(s, t, u) &= st(1-u) \\ N_4(s, t, u) &= (1-s)t(1-u) \\ N_5(s, t, u) &= (1-s)(1-t)u \\ N_6(s, t, u) &= s(1-t)u \\ N_7(s, t, u) &= stu \\ N_8(s, t, u) &= (1-s)tu \end{aligned}$$

**Слика 3.3.1** Хексадрални елемент коначне запремине и три-линеарне функције облика у чворовима елемента

Сума се врши по свим тачкама интеграције посматране контролне запремине, при чему "0" означава претходни временски корак. Резултати прорачуна и карактеристике флуида се прорачунавају у чворовима, а одатле се применом интерполационих функција рачунају за тачке интеграције. Вредност било које

величине у домену елемента се рачуна као  $\varphi = \sum_{i=1}^{N_{cv}} N_i \varphi_i$ , где је  $N_i$  - функција облика а  $\varphi_i$  вредност функције за чвор  $i$ . Сумирање се спроводи за свих  $N_{cv}$  чворова елемента. Осим за вредности промењивих, интерполационе функције се користе и за прорачун геометријских карактеристика елемента, као што су положај тачака интеграције, површине страна елемента исл. У прорачунима чији резултати су приказани у глави 5, коришћени су само хексахедрални елементи, чије су интерполационе функције и геометрија приказане на слици 3.3.1.



Слика 3.3.2 Положај контролне запремине уз зид

Две додатне једначине  $k-\omega$  заснованог SST модела у елементима близу зида канала [84] и стандардни  $k-\epsilon$  модел [108] у осталом делу струје су коришћени за формирање комплетног система једначина струјања. Уводи се ограничење за турбулентну вискозност у облику:

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (3.3.7)$$

где је  $S$  инваријантна мера нивоа деформације,  $v_t = \mu_t/\rho$ ;  $F_2 = \tanh(\arg_2^2)$  је апроксимативна функција која зависи од удаљености коначне запремине од зида  $d$  преко:  $\arg_2 = \max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta' \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega}\right)$ , где је  $\beta' = 0,09$ ,  $k$  - кинетичка енергија а  $\omega$  - фреквенција турбуленције. Алгебарска техника коју је предложио Raw [109] је коришћена за решавање дискретног система формираних линеаризованих једначина. Захваљујући оваквој концепцији, остварено је да је брзина чвора на

зиду као граници домена једнака нули (слика 3.3.2). Такође, у случају да се на површи раздвајања структуралног и струјног домена оствари поклапање њихових мрежа (чворова), пренос утицаја из једног на други домен врши се без интерполације преносене величине (описано у поглављу 4.3).

Градијент неке величине  $\varphi$  у чворовима се добија применом *Gauss*-ове теореме

као  $\nabla\varphi = \frac{1}{V} \sum_{ip} (\varphi\Delta\vec{n})_{ip}$ , при чему се вредност величине  $\varphi$  у тачкама интеграције

одређује коришћењем функција облика на основу вредности величине  $\varphi$  у чворовима. Одређивање адвективног члана се спроводи према шеми:

$$\varphi_{ip} = \varphi_{up} + \beta \nabla\varphi \cdot \Delta\vec{r} \quad (3.3.8)$$

при чему је  $\varphi_{up}$  вредност промењиве у узводном чвору,  $\vec{r}$  вектор од узводног чвора до посматране тачке интеграције  $ip$ . Начин одређивања величина  $\beta$  и  $\nabla\varphi$  одређује врсту коришћене диферентне шеме. У нашим прорачунима је увек коришћена шема високе резолуције (*High Resolution Scheme*). Адвективни флуks се одређује на основу вредности  $\beta$  и  $\nabla\varphi$  у узводном чвору. Вредност фактора  $\beta$  се одређује тако да буде што ближа 1, при чему се прво одређују минимална  $\varphi_{\min}$  и максимална  $\varphi_{\max}$  вредност у сваком чвору, а затим се за сваку тачку интеграције  $ip$  око посматраног чвора решава једначина (3.3.8) по величини  $\beta$ . За вредност  $\beta$  у чвору се узима најмања од свих вредности  $\beta$  прорачунатих у околним тачкама интеграције.

Површински интеграл у јед. (3.3.2) захтева одређивање вредности  $(P\Delta n_{ip})_{ip}$  у свакој тачки интеграције. при чему се вредност  $P_{ip}$  у тачки интеграције одређује преко вредности  $P_n$  у чвору и функција облика  $N_n(s_{ip}, t_{ip}, u_{ip})$  за локалне координате тачке интеграције  $ip$  као  $P_{ip} = \sum_n N_n(s_{ip}, t_{ip}, u_{ip}) P_n$ . Алгоритам софтвера

ANSYS CFX користи не-измештену (*non-staggered*) мрежу тако да су контролне запремине идентичне за све транспортне једначине. Са циљем да се избегне раздвајање поља притиска [25], примењује се модификовани алгоритам дискретизације преноса масе који је предложио *Majumdar* у раду: ”*Role of*

*Underrelaxation in Momentum Interpolation for Calculation of Flow with Nonstaggered Grids*”, Numerical Heat Transfer Fundamentals 13(1), pp.125-132, 1988.

Применом једначине сличне једначини (3.3.5) у свакој од тачака интеграције, за брзину преноса масе се добија:

$$U_{i,ip} = \bar{U}_{i,ip} + f_{ip} \left( \left( \frac{\partial p}{\partial x_i} \right)_{ip} - \left( \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \right)_{ip} \right) - c_{ip} f_{ip} (U_{i,ip}^0 - \bar{U}_{i,ip}^0) \quad (3.3.9)$$

где је  $f_{ip} = \frac{d_{ip}}{1 - c_{ip} d_{ip}}$ ,  $d_{ip} = -\frac{V}{A}$ ,  $A$  – апроксимација централног коефицијента

једначине количине кретања без нестационарног члана,  $c_{ip} = \frac{\rho}{\Delta t}$ . Линија изнад промењиве означава њену усредњену вредност у тачки интеграције, "0" означава вредност у претходном временском кораку.

Када се контролна запремина не деформише током времена, општи облик дискретизованог нестационарног члана за  $n$ -ти временски корак је:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \varphi dV \approx V \frac{(\rho \varphi)^{n+\frac{1}{2}} - (\rho \varphi)^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} \quad (3.3.10)$$

где су вредности на почетку и на крају временског корака означене са експонентом  $n+1/2$  и  $n-1/2$  респективно. У нашим прорачунима струјања флуида дискретизација је извршена коришћењем *Euler*-ове повратне шеме другог реда (*Second Order Backward Euler scheme*), где се вредности на почетку и крају временског корака апроксимирају према једначинама:

$$(\rho \varphi)^{n-\frac{1}{2}} = (\rho \varphi)^0 + \frac{1}{2} ((\rho \varphi)^0 - (\rho \varphi)^{00}), \quad (\rho \varphi)^{n+\frac{1}{2}} = (\rho \varphi) + \frac{1}{2} ((\rho \varphi) - (\rho \varphi)^0) \quad (3.3.11)$$

Унос израза (3.3.11) у јед. (3.3.10) резултира дискретизацијом облика:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \varphi dV \approx V \frac{1}{\Delta t} \left( \frac{3}{2} (\rho \varphi) - 2 (\rho \varphi)^0 + \frac{1}{2} (\rho \varphi)^{00} \right) \quad (3.3.12)$$

Ова шема је робусна, имплицитна, конзервативна у времену и не постоји ограничење по питању величине временског корака [26], другог реда тачности по времену, али може довести до нефизичких осцилација резултата прорачуна.

Ако се контролна запремина деформише током времена, интегралне једначине конзервације (3.3.1) – (3.3.3) након примене *Leibnitz*-овог правила имају облик:

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho dV + \int_S \rho (U_j - W_j) dn_j = 0 \quad (3.3.13)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho U_i dV + \int_S \rho (U_j - W_j) U_i dn_j = - \int_S p dn_j + \int_S \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) dn_j + \int_V S_{U_i} dV \quad (3.3.14)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho \phi dV + \int_S \rho (U_j - W_j) \phi dn_j = \int_S \Gamma_{eff} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) dn_j + \int_V S_\phi dV \quad (3.3.15)$$

где је  $W_j$  брзина границе контролне запремине. Нестационарни члан представља ниво промене у деформисаној контролној запремини, а адвективни члан представља укупан пренос промене кроз покретну страну контролне запремине. Ако дискретизовани нестационарни и адвективни чланови не задовољавају услов геометријске конзервације (*Geometric Conservation Law* – GCL) дат као:  $\frac{d}{dt} \int_{V(t)} dV = \int_S W_j dn_j$ , може доћи до не испуњавања услова одржања

посматраних величина. За сваку контролну запремину ниво промене њене запремине мора бити једнак запремини коју пребришу њене границе при кретању.

У току спровођења сваког од корака уноса оптерећења (*time step*-а) спрегнутог FSI прорачуна, поставља се услов да су померање и брзина чворова две различите мреже (домена флуида и домена структуре) који се налазе у површи раздвајања а који имају исте координате, идентичне. Једначине померања чворова нумеричке мреже на додирној површини структура/флуид се решавају итеративно до испуњавања постављених услова конвергенције, и прорачунавају се нове координате чворова мреже на додирној површини у зависности од померања чворова мреже структуралног домена који леже у површини раздвајања струјног и

структуралног домена у односу на њихов претходни положај. Дискретизационе једначине су модификоване да омогуће брзину чворова мреже различиту од нуле и промењиву запремину елемента коначних запремина [111]. Кретање мреже је симулирано применом методе прилагођавања границе (*boundary conforming method*) и произвољне Лагранж-Ојлерове (ALE) формулације [53] за новоуведену промењиву брзине чворова мреже коначних запремина. Нове координате се користе за следећи корак решавања транспортних једначина (хидродинамичких, турбуленције итд.). Померања чворова мреже домена флуида који не леже у површи раздвајања су одређена померањима чворова који у тој површи леже, увођењем модела крутости мреже [35]. Решавањем једначине:

$$\nabla \cdot (\Gamma_{pom} \nabla \delta) = 0 \quad (3.3.16)$$

где је  $\delta$  релативно померање у односу на претходни положај мреже а  $\Gamma_{pom}$  крутост мреже, се одређује ниво истовременог померања дефинисаног скупа чворова у домену флуида. Ова једначина се решава на почетку сваке глобалне итерације или временског корака. У нашим моделима струјања кроз канал коришћен је модел нелинеарне промене крутости са удаљењем од деформабилних граница домена, тј. зидова канала, чиме је омогућено да елементи који су удаљенији од зидова приме већу деформацију. У ту сврху је решавана додатна једначина облика:

$$\Gamma_{pom} = \left( \frac{1}{d} \right)^{C_{stiff}} \quad (3.3.17)$$

где експонент модела крутости мреже  $C_{stiff}$  обезбеђује експоненцијалну промену крутости  $\Gamma_{pom}$  са одстојањем од најближег зида  $d$ . Брзина границе контролне запремине  $W_j$  која фигурише у јед. (3.3.13) - (3.3.15) је количник оствареног померања границе у текућем временском кораку и текућег временског корака. За разлику од других класа једначина, ниво конвергенције (одређен критеријумима и контролним параметрима) једначине померања чворова нумеричке мреже не зависи од критеријума конвергенције постављених за остале једначине.

Једначине модела деформације мреже (3.1.13) – (3.1.17), као и једначина транзиције турбулентних модела уз зид и у слободној струји (3.3.7) се базирају на вредности одстојања од зида  $d$ . У општем случају, одстојање од зида на којем је за посматрану величину постављен *Dirichlet*-ов услов  $\varphi = 0$ , а *Neumann*-ов услов да је флуks на осталим границама једнак нули, добија се као  $d = -|\nabla \varphi| + \sqrt{|\nabla \varphi|^2 + 2\varphi}$ .

За разлику од софтверских пакета који прво решавају линеаризоване системе једначина одржања, коришћењем претпостављене вредности притиска, а затим прорачунавају корекцију поља притиска (*segregated solvers*), те због тога захтевају велики број итерација и правилан избор параметара релаксације нумеричког прорачуна, софтвер ANSYS CFX користи тзв. спрегнути солвер који решава истовремено хидродинамичке једначине (за  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ,  $p$ ) као један систем. Овакав приступ користи потпуну имплицитну дискретизацију једначина у сваком временском кораку.

### 3.4 Карактеристичне временске скале

На основу закључака датих у [29] у већини проблема где се јављају термички индуковани напони, могуће је занемарити како ефекат спреге термичких и напонско-деформацијских појава, тако и ефекат инертности преноса утицаја кроз простор. Ако се претпостави да се ефекат спреге може занемарити, општи термо – напонски проблем се може посматрати као два одвојена проблема која се могу решавати посебно. Први од споменутих проблема је познат као теорија провођења топлоте. Једначина која је задовољена у свакој тачки посматраног домена, као и на границама, за константне карактеристике материјала и не постојање извора топлоте у домену је облика  $\kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} = \rho c_v \frac{\partial T}{\partial t}$ , где је  $\kappa$  – коефицијент топлотне проводљивости,  $T$  – температура,  $\rho$  – густина,  $c_v$  – топлотни капацитет,  $t$  – време,  $j$ - координатни правац у ком се простире топлота. Када се одреди температурно поље и занемари ефекат инертности, одређивање резултујуће расподеле напона се

своди на проблем неспрегнуте квазистатичке линеарне теорије термоеластичности описан јед. (2.1) – (2.3). У тим једначинама не постоје изводи по времену неке од величина, те ако ни гранични услови такође не садрже изводе по времену, време постаје параметар термоеластичног проблема и постоји потпуна математичка аналогија између решења које одговара фамилији статичких расподела температуре која зависи од параметра  $c$  и решења проблема са временски промењивом расподелом температура. Потребан али не и довољан услов да појаву можемо сматрати статичком је однос времена одговора (временска скала) посматране појаве на спољашње утицаје, како су истакли *Boley* [29] и *Culler* [57]. Тако се за главни параметар при оцени да ли ће доћи до термички индукованих осцилација узима однос карактеристичних времена термичког и структуралног одговора [29, 77]. У студији *Thornton* [77] је закључено да ако је време термичког одговора значајно веће од времена структуралног одговора, термички индуковане вибрације су занемарљиве и оправдано је спровести квази-статичку термо-структуралну анализу у којој су ефекти инертности занемарени, па је напонско-деформационо стање структуре функција тренутне расподеле термичког оптерећења. Тиме је процедура прорачуна сведена на нестационарну термичку и статичку структуралну анализу.

Карактеристична временска скала термичког одговора је повезана са *Fourier*-овим бројем, који упоређује карактеристичну димензију тела кроз коју пролази топлота (дебљину плоче  $h$ ) са приближно одређеном дубином продора топлотног утицаја у датом времену, *Thornton* [77]:

$$F_o = \frac{kt}{\rho ch^2} \quad (3.4.1)$$

Ова величина не зависи од конвективних и радијационих граничних услова и дефинисана је са коефицијентом топлотне проводљивости  $k$ , густином  $\rho$  и специфичним топлотним капацитетом  $c$ . Када је  $F_o = 1$ , продор температурног утицаја је једнак карактеристичној димензији – дебљини – па време продора  $t$  постаје временска скала термичког одговора:



$$t_T = \frac{\rho ch^2}{k} = 24,1 \text{ s за наш случај.} \quad (3.4.2)$$

Карактеристично време структуралног одговора је једнако периоду најниже сопствене фреквенције осциловања [57, 77]:

$$t_S = \frac{1}{f_1} = 2,7 \cdot 10^{-2} \text{ s за наш случај.} \quad (3.4.3)$$

Карактеристично време одговора флуида проценио је *Kamakoti* [90] као однос карактеристичне дужине и брзине посматраног поремећаја:

$$t_F = \frac{L}{U} = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ s за наш случај.} \quad (3.4.4)$$

У горњој једначини смо за карактеристичну дужину узели  $L = 1,875 \text{ m}$ , тј. дужину секције 1 у правцу  $x$ -осе (јер је секција 1 је најдужа од све три секције канала) и претпостављена је брзина преноса поремећаја (брзина звука) од  $U = 330 \text{ m/s}$ . Видимо да је  $t_S$  три реда величина мањи од  $t_T$ , те је оправдано да се примени квазистатички термонапонски прорачун јер не би требало да дође до појаве термички индукованих осцилација. Карактеристично време одговора флуида  $t_F$  је за ред величина мањи од  $t_S$  што указује на то да је одговор флуида квази-стационаран тј. одређен тренутном деформацијом структуре. Треба напоменути да се вредности за  $t_F$  и  $t_S$  приказане у прегледаној литератури [57, 77, 90] разликују за три и више редова величина.

Да би један струјно-термичко-структурални проблем могли да сматрамо квазистатичким, осим услова  $B \gg 1$  мора бити обезбеђен и услов динамичке аероеластичне стабилности, што значи да притисак у струјном домену индукован деформацијом структуралног домена не изазива појаву и повећање осцилације (*flutter*) или појаву скока (*snap-through*) [77]. Такође, ако постоји динамичко оптерећење оно треба да буде такво да не изазива вибрације структуре. Структура канала који посматрамо је изложена вибрацијама самог млинског постројења као и нестационарном току струје аеросмеше кроз канал, тако да је потребно додатно истражити утицај ових оптерећења на термички оптерећену структуру канала.

## 4 Нумерички модели

### 4.1 Нумерички модел структуре канала

#### 4.1.1 Карактеристике коришћених коначних елемената

У овом поглављу су у кратким цртама описани типови коначних елемената љуске из базе коначних елемената софтверског пакета ANSYS који су коришћени у нумеричким прорачунима [24]. Координатна оса  $z$  локалног координатног система је увек нормална на средњу површ коначног елемента љуске.

*Тип елемента ET1 (SHELL 63)* је линеарни коначни елемент са 4 чвора и шест степени слободе у сваком чвору (транслације у правцу оса локалног координатног система чвора и ротације око оса). Омогућава коришћење конзистентне тангентне матрице крутости за решавање великих дефлекција и коначних ротација.

*Тип елемента ET2 (SHELL 93)* је изопараметарски елемент вишег реда са шест степени слободе у сваком од осам чворова (транслације у  $x$ ,  $y$  и  $z$  правцу координатног система чвора и ротације око тих оса). Интерполационе функције по померањима за овај елемент имају следећи облик:

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^8 N_i \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix} + \sum_{i=1}^8 N_i \frac{rt_i}{2} \begin{bmatrix} a_{1,i} & b_{1,i} \\ a_{2,i} & b_{2,i} \\ a_{3,i} & b_{3,i} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_{x,i} \\ \theta_{y,i} \end{Bmatrix} \quad (4.1.1)$$

$N_i$  – функције облика ( $I, J, K, L$ , - спољашњи,  $M, N, O, P$  – унутрашњи чворови):

$$\begin{aligned} N_I &= \frac{1}{4}(1-s)(1-t)(-s-t-1), \quad N_J = \frac{1}{4}(1+s)(1-t)(s-t-1), \quad N_K = \frac{1}{4}(1+s)(1+t)(s+t-1) \\ N_L &= \frac{1}{4}(1-s)(1+t)(-s+t-1), \quad N_M = \frac{1}{4}(1-s^2)(1-t), \quad N_N = \frac{1}{4}(1+s)(1-t^2), \\ N_O &= \frac{1}{4}(1-s^2)(1+t), \quad N_P = \frac{1}{4}(1-s)(1-t^2) \end{aligned} \quad (4.1.2)$$

*Тип елемента ET4 (SHELL 181)* је линеарни изопараметарски елемент љуске, коришћен без додатних функција облика. Садржи четири спољашна чвора са по шест (споменутих) степени слободе. Функције облика за матрицу крутости су дате са ( $I, J, K, L$  – ознаке чворова, изрази за  $v, w, \theta_x, \theta_y$  и  $\theta_z$  се добијају аналогно):

$$u = \frac{1}{4}(u_I(1-s)(1-t) + u_J(1+s)(1-t) + u_K(1+s)(1+t) + u_L(1-s)(1+t)) \quad (4.1.3)$$

*Тип елемента ET5 – (SHELL 281)* је коначни елемент са осам чворова и шет степени слободе у чвору. Функција облика матрице крутости и тангентне матрице крутости елемента су (изрази за  $v, w, \theta_x, \theta_y$  и  $\theta_z$  се добијају аналогно):

$$u = \frac{1}{4}(u_I(1-s)(1-t)(-s-t-1) + u_J(1+s)(1-t)(s-t-1) + u_K(1+s)(1+t)(s+t-1) + u_L(1-s)(1+t)(-s+t-1)) + \frac{1}{2}(u_M(1-s^2)(1-t) + u_N(1+s)(1-t^2) + u_O(1-s^2)(1+t) + u_P(1-s)(1-t^2)) \quad (4.1.4)$$

Формулација последња два елемента је заснована на логаритамским деформацијама и стварним вредностима напона. Кинематика ових елемената дозвољава коначне мембранске деформације али се сматра да је промена кривине мала са уносом оптерећења.

#### 4.1.2 Гранични услови по померањима

За све моделе коначних елемената унет је услов симетрије у односу на вертикалну осу, тј.  $v = 0$  за чворове нумеричке мреже са  $y = 0$ . Чворовима који се налазе у пресецима  $x = 0, x = 1,875$  m као и чворовима у излазном пресеку спречена су померања  $u = v = w = 0$  и ротације око координатних оса ( $\alpha = \beta = \gamma = 0$ ).

#### 4.1.3 Карактеристике материјала и коришћени модел

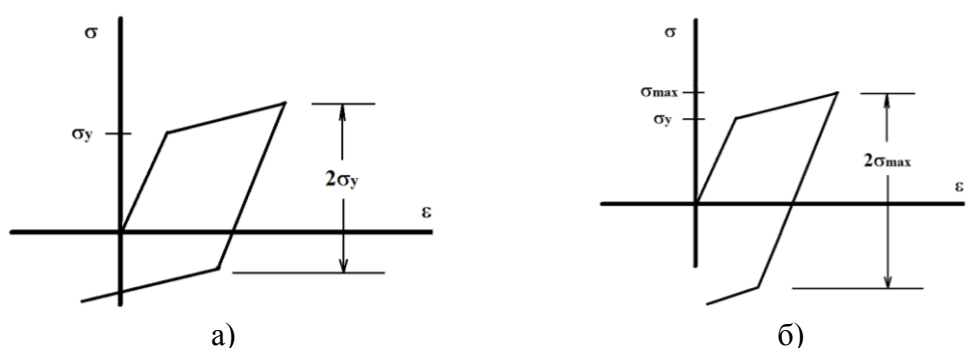
Структура канала аеросмеше чини изотропни материјал челик ознаке JUS Č.4578, W.Nr. 1.4841 или EN/DIN X15 CrNiSi 25-21. Промена Јунговог модула

еластичности  $E$ , границе еластичности (напон течења) при 0,2% деформације  $\sigma_y$ , максималне носивости  $\sigma_u$  и тангентног модула  $E_T$  са температуром приказане су у табели 1. За референтну температуру при којој претпостављамо да нема термички индукованих деформација у структури плоче узета је вредност  $T_{ref} = 273\text{K}$ .

**Табела 4.1** Карактеристике материјала челик  $\check{C}$ . 4578 у зависности од температуре

$T(^{\circ}\text{K})$	293	843	873	923	973	993	1023	1073	1123	1173
$E(\times 10^9\text{Pa})$	203	107.5	100	92.3	80.75	73.15	61.55	50	38.5	30.75
$\sigma_y(\times 10^6\text{Pa})$	230	215	207	184.6	161.5	146.3	123.1	100	77	61.54
$\sigma_u(\times 10^6\text{Pa})$	577	453.8	423	377	323	300	261.5	208	161.5	130.8
$E_T(\times 10^6\text{Pa})$	1201	370.8	370.5	380.2	377.3	370.4	340.9	261.5	200.7	150.6

Следеће карактеристике коришћеног материјала узете су као непромењиве са температуром: густина  $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$ , линеарни коефицијент истежања  $\alpha = 19.0 \times 10^{-6} \text{ m/m}^{\circ}\text{C}$  (за област  $20^{\circ}\text{C} < T < 1000^{\circ}\text{C}$ ), Пуасонов коефицијент  $\nu = 0.29$ , специфични топлотни капацитет  $c = 502,4 \text{ J/kgK}$ , коефицијент топлотне проводљивости  $k = 16,3 \text{ W/mK}$ .



**Слика 4.1.1** Напонско-деформациони модели материјала  $\check{C}$ . 4578, а) билинерни кинематски (BKIN) и б) билинеарни изотропски (BISO)

Услов течења (јед. 2.5.4) дефинише напон при којем почиње течење и може се приказати као еквивалентни напон  $\sigma_e$ :

$$\sigma_e = f(\{\sigma\}) = \sigma_y \quad (4.1.5)$$

при којем ће доћи до појаве пластичних деформација. У овом раду су коришћена два напонско-деформациона модела материјала: билинерни кинематски (BKIN,

слика 4.1.1.a) и билинеарни изотропски (BISO, слика 4.1.1б). Закон ојачања (2.5.8) утиче да се услов течења мења са изотропским или кинематким ојачањем, па се услов течења (2.5.2) дат у облику (4.1.5) може представити и као  $F(\{\sigma\}, \kappa, \{\alpha\}) = 0$ , где је  $\{\alpha\}$  - транслација површи течења,  $\kappa$  - сума радова пластичног деформисања

$$\kappa = \int \{\sigma\}^T [M] \{d\varepsilon^{pl}\} \quad (4.1.6)$$

где је матрица  $[M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$ . Транслација површи течења такође

зависи од историје уноса оптерећења, а положај центра површи течења је  $\{\alpha\} = \int C \{d\varepsilon^{pl}\}$ , при чему је  $C$  параметар материјала. На основу јед. (4.1.6) добијамо  $d\kappa = \{\sigma\}^T [M] \{d\varepsilon^{pl}\}$ . Укупна деформација се може сматрати као збир еластичне и пластичне деформације  $\{d\varepsilon^{el}\} = \{d\varepsilon\} - \{d\varepsilon^{pl}\}$ . Диференцирањем  $F(\{\sigma\}, \kappa, \{\alpha\}) = 0$  добија се услов конзистенције:

$$dF = \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T [M] \{d\sigma\} + \frac{\partial F}{\partial \kappa} d\kappa + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \alpha} \right\}^T [M] \{d\alpha\} = 0 \quad (4.1.7)$$

Коришћењем јед. (4.1.7), рачунајући инкремент напона као  $\{d\sigma\} = [D] \{d\varepsilon^{pl}\}$ , где је  $[D]$  - напонско-деформациона матрица и применом закона течења (2.5.7), након сређивања, може се одредити инкремент пластичне деформације:

$$\{d\varepsilon^{pl}\} = \lambda \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \quad (4.1.8)$$

Величина инкремента пластичне деформације зависи од инкремента укупне деформације, тренутог напонског стања, форме површи течења и потенцијала.

Коефицијент пропорционалности  $\lambda$  одређује се као:

$$\lambda = \frac{\left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T [M][D]\{d\varepsilon\}}{-\left\{ \frac{\partial F}{\partial \kappa} \right\} \{\sigma\}^T [M] \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} - C \left\{ \frac{\partial F}{\partial \alpha} \right\}^T [M] \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T [M][D] \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\}}$$

За успостављање услова (4.1.7) користи се *Euler* – ова повратна шема према следећем алгоритму [24]:

- 1) за дати корак уноса оптерећења, одређује се карактеристика материјала  $\sigma_y$  као напон течења за дату температуру према јед. (4.1.5),
- 2) одређује се пробна вредност напона за текући корак уноса оптерећења  $\{\sigma_n^{tr}\} = [D]\{\varepsilon_n^{tr}\}$  на основу пробне вредности деформације за текући корак  $\{\varepsilon_n^{tr}\}$  одређене на основу укупне деформације за текући корак  $\{\varepsilon_n\}$  и пластичне деформације у претходном кораку  $\{\varepsilon_{n-1}^{pl}\}$  као  $\{\varepsilon_n^{tr}\} = \{\varepsilon_n\} - \{\varepsilon_{n-1}^{pl}\}$ ,
- 3) одређује се еквивалентни напон  $\sigma_e$  за текуће напонско стање. Ако је  $\sigma_e < \sigma_y$  инкремент пластичне деформације се не прорачунава. У супротном се одређује коефицијент пропорционалности  $\lambda$  применом *Newton-Raphson* – ове итеративне процедуре у  $n$ -том кораку уноса оптерећења,
- 4) применом јед. (4.1.8) одређује се  $\{\Delta\varepsilon^{pl}\}$ , одређују се текућа пластична  $\{\varepsilon_n^{pl}\} = \{\varepsilon_{n-1}^{pl}\} + \{\Delta\varepsilon^{pl}\}$  и еластична  $\{\varepsilon^{el}\} = \{\varepsilon^{tr}\} - \{\Delta\varepsilon^{pl}\}$  деформација. Вектор напона се одређује као  $\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^{el}\}$ ,
- 5) прорачунава се инкремент пластичног рада  $d\kappa = \{\sigma\}^T [M]\{d\varepsilon^{pl}\}$  и положај центра површи течења  $\{\Delta\alpha\} = \int C\{d\varepsilon^{pl}\}$ , а затим и њихове текуће вредности  $\kappa_n = \kappa_{n-1} + \Delta\kappa$  и  $\{\alpha_n\} = \{\alpha_{n-1}\} + \{\Delta\alpha\}$  у  $n$ -том кораку уноса оптерећења,

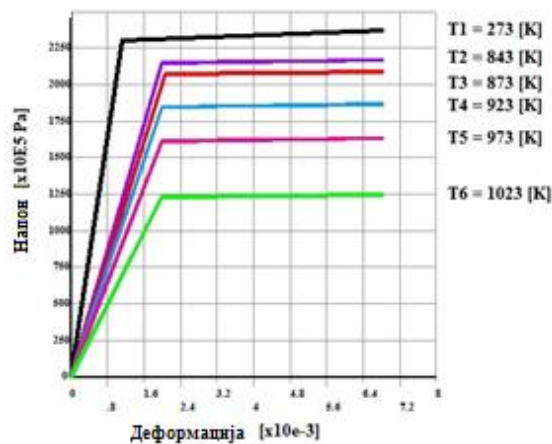
- 6) одређује се инкремент пластичне деформације као

$$\Delta\hat{\varepsilon}^{pl} = \left( \frac{2}{3} \{\Delta\varepsilon^{pl}\}^T [M] \{\Delta\varepsilon^{pl}\} \right)^{\frac{1}{2}},$$

- 7) у случају *BKIN* модела еквивалентни напон јед. (4.1.5) је облика

$$\sigma_e = \left[ \frac{2}{3} (\{S\} - \{\alpha\})^T [M] (\{S\} - \{\alpha\}) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad \text{где је вектор напона}$$

$\{S\} = \{\sigma\} - \sigma_m [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ , средњи или хидростатички притисак  $\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$ , а  $\{\alpha\}$  је вектор translације површи течења који се одређује на основу  $\{\alpha\} = \int C \{d\varepsilon^{pl}\}$ . Иако  $\sigma_e$  зависи од вектора  $\{S\}$ , течење је независно од  $\sigma_m$ . Када је  $\sigma_e$  једнак униаксиалном напону течења  $\sigma_y$ , сматрамо да почиње течење. Одговарајући критеријум течења за овај модел је  $F = \left[ \frac{3}{2} (\{S\} - \{\alpha\})^T [M] (\{S\} - \{\alpha\}) \right]^{\frac{1}{2}} - \sigma_y = 0$ , а закон течења у облику  $\left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} = \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\} = \frac{3}{2\sigma} (\{S\} - \{\alpha\})$ , тако да је инкремент пластичне деформације нормалан на површ течења. Транслација површи течења  $\{\alpha\} = 2G \{\varepsilon^{sh}\}$  је одређена преко деформације  $\{\varepsilon_n^{sh}\} = \{\varepsilon_{n-1}^{sh}\} + \{\Delta\varepsilon^{sh}\}$  за текући корак  $n$  уноса оптерећења, при чему је  $G = E/(2(1+\nu))$  – модуо смицања,  $E$  – Young-о модуо еластичности,  $\nu$  – Poisson-ов коефицијент. Инкремент померања површи течења између текућег и претходног корака уноса оптерећења се одређује као  $\{\Delta\varepsilon^{sh}\} = \frac{C}{2G} \{\Delta\varepsilon^{pl}\}$ , где је  $C = \frac{2}{3} \frac{EE_T}{E - E_T}$ ,  $E_T$  – тангентни модуо еластичности одређен из билинеарне криве униаксијални напон-деформација. Еквивалентна пластична деформација  $\hat{\varepsilon}_n^{pl} = \hat{\varepsilon}_{n-1}^{pl} + \Delta\hat{\varepsilon}^{pl}$  зависи од историје оптерећења.



Слика 4.1.2 Модел нелинеарности материјала са температуром

8) У случају *BISO* модела, еквивалентни напон се добија као  $\sigma_e = \left[ \frac{3}{2} \{S\}^T [M] \{S\} \right]^{\frac{1}{2}}$ ,

где је вектор напона  $\{S\}$  одређен као у претходном случају. Критеријум течења

је  $F = \left[ \frac{3}{2} \{S\}^T [M] \{S\} \right]^{\frac{1}{2}} - \sigma_y^k$ , где је  $\sigma_y^k$  текући напон течења, који је за *BISO*

модел функција количине извршеног рада на пластичном деформисању. У нашим моделима је претпостављена изотропност материјала и развој пластичних деформација. Вредност за  $\sigma_y^k$  се може добити директно из једначине за еквивалентну пластичну деформацију у текућем кораку, која зависи од историје оптерећења  $\hat{\varepsilon}_n^{pl} = \hat{\varepsilon}_{n-1}^{pl} + \Delta \hat{\varepsilon}^{pl}$  на основу криве напон-деформација за задати материјал.

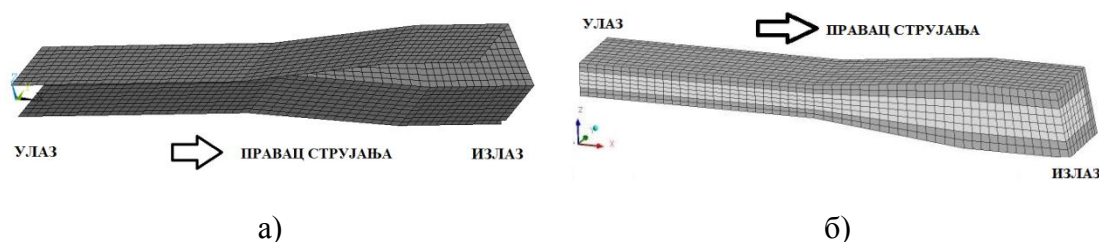
Модел нелинеарне промене напонско-деформационе карактеристике коришћеног челика са температуром формиран је на основу података датих у таб. 4.1 и *BKIN* модела. У виду серије билинеарних кривих за одређене вредности температуре приказан је на слици 4.1.2. Са порастом температуре вредност коефицијента термичког ширења расте, тако да коришћење константне вредности у целом посматраном опсегу температура неминовно доводи до потцењених вредности термички индукованих напона у структури при вишим температурама.

#### 4.1.4 Густина нумеричких мрежа

Густина нумеричких мрежа (број елемената) коришћених за дискретизацију структуралног или нумеричког домена струјног поља дефинисана је параметрима  $F_{gm}^S$  и  $F_{gm}^F$  респективно. Ови параметри су узимали вредности од 1 до 3 којима је одговарао број елемената дискретизације од 435 до 3915 за структурални и од 560 до 15120 за домен струјања флуида. Једнакост  $F_{gm}^S = F_{gm}^F$  значи да је остварено поклапање нумеричких мрежа на површи разграничења модела различитих физичких домена. Фактори густине мрежа су дефинисани тако да за целобројна вредност обезбеђује квадратни облик коначних елемената структуралног модела



секције 1 и коцкасти облик коначних запремина којима је дискретизован домен флуида секције 1 уз плоче. У остале две секције канала, као и за вредности  $F_{gm}$  које нису целобројне, није било могуће одржати овај услов, али су провераване геометријске карактеристике дискретизационих елемената након завршеног прорачуна у циљу провере нивоа деформисаности елемената.



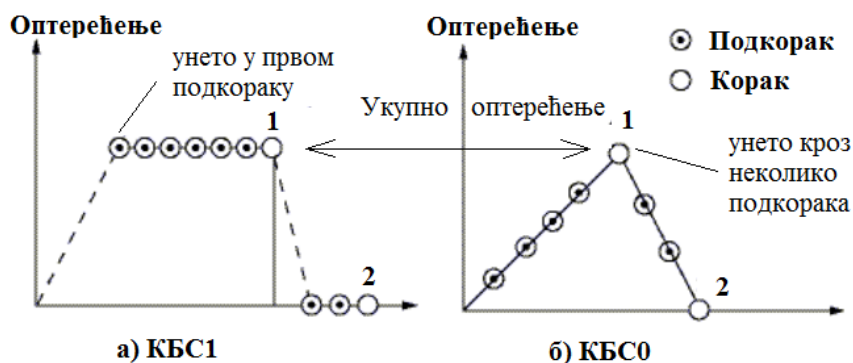
**Слика 4.1.3** Дискретизационе мреже за вредности параметара  $F_{gm}^S = F_{gm}^F = 2$ , а) модел коначних елемената, б) модел коначних запремина

Стога су све дискретизационе мреже домена струјања флуида структуриране и нема троугаоних / тетраедалних или елемената других облика. Број коначних елемената по дебљини плоче је био  $BE = 1$ , сем у прорачунима где је коришћено више коначних елемената по дебљини плоче, што је истакнуто преко вредности параметра  $BE$ . Примери дискретизационих мрежа коначних елемената структуралног домена и коначних запремина струјног домена за  $F_{gm}^S = F_{gm}^F = 2$  приказани су на сликама 4.1.3а и 4.1.3б респективно.

#### 4.1.5 Алгоритам уноса оптерећења у структурални модел

Постоје два модела уноса спољашњег оптерећења у нумерички прорачун модела коначних елемената [22, 24] како је шематски приказано на слици 4.1.4. Први модел који ћемо изначити са КВС1 претпоставља да се целокупно оптерећење (гранични услови, силе, површинско, запреминско и инерцијално оптерећење) за које се тражи решење, у пуном износу унесе у првом подкораку уноса оптерећења за посматрани корак уноса оптерећења (слика 4.1.4а). Конвергентно решење јед. (3.1.6) тражи се за пуну вредност вектора спољних сила  $Q$  кроз серију итерација и коришћењем различитих метода (бисекције, предиктор-коректор,

повећање броја итерација итд.) за решавање нелинеарног система алгебарских једначина.



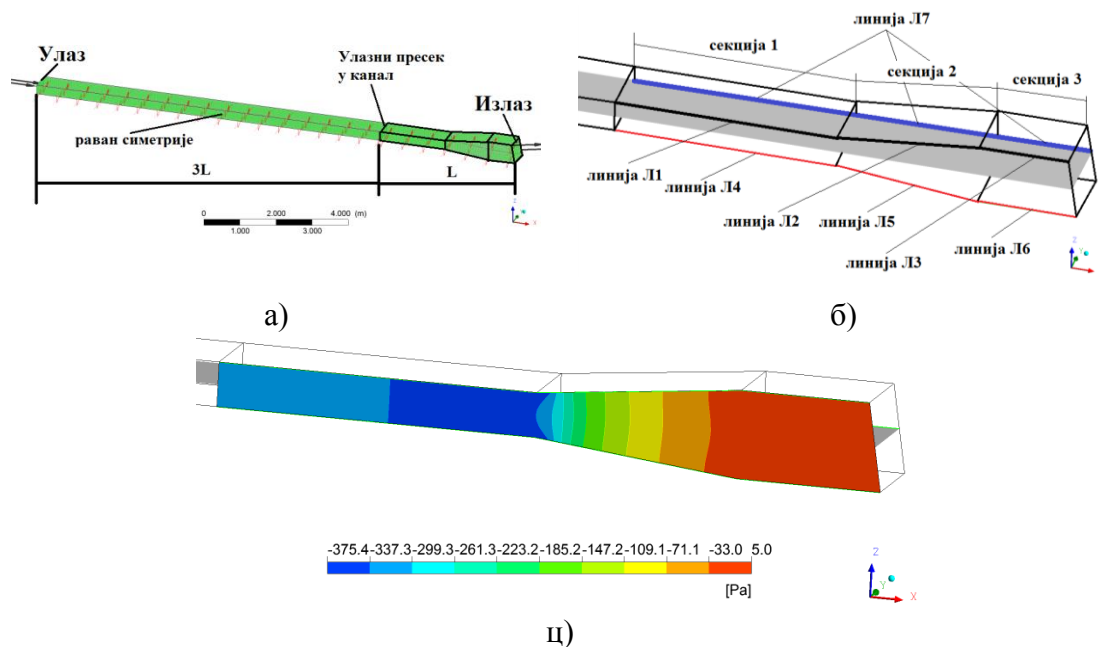
**Слика 4.1.4.** Алгоритми уноса укупног оптерећења у структурални модел КЕ, а) у првом подкораку, модел КВС1, б) кроз више подкорака, модел КВС0

Други модел који ћемо означити са КВС0 претпоставља линеарну интерпоалцију оптерећења током низа подкорака уноса оптерећења, од вредности претходног корака уноса оптерећења до вредности дефинисане за текући корак. Унос оптерећења је у деловима, тако да у првом подкораку тражимо конвергентно решење система једначина (3.1.6) за вредност вектора спољашњег оптерећења задато на пример као 10% пуне вредности оптерећења  $Q$ . Затим у другом подкораку још 10%, тако да на крају другог подкорака имамо унетих 20% укупног оптерећења итд. (слика 4.1.4б). У нашим прорачунима првенствено је коришћен модел КВС0, али и модел КВС1 као и њихова комбинација. За сваки од приказаних прорачуна биће истакнут начин на који је извршен унос оптерећења у модел коначних елемената.

Унос температуре у чворовима као оптерећења структуралног модела коначних елемената је увек спровођен у првом подкораку уноса оптерећења према КВС1 моделу, што је понекад доводило до проблема са конвергенцијом. У том случају је дефинисано више корака уноса температуре, где је температура у сваком од корака уношена према КВС0 моделу одмах већ у првој итерацији, до вредности  $T/(\text{број корака})$ , све док се не оствари правилан избор броја корака уноса оптерећења који обезбеђује постизање конвергентног решења.

## 4.2 Гранични и почетни услови у струјном домену

На основу резултата експерименталног испитивања брзинског поља на улазу у канал аеросмеше (т.5.1) претпостављено је да се као почетни услов у струјном домену може узети струјна слика развијеног струјног поља добијена за нумерички случај модела канала продуженог 3 дужине од улазног пресека (слика 4.2.1а), са граничним условима брзине на улазу у продужени канал  $V_{ul} = 10, 15, 20, 25$  и  $30$  m/s, условом симетрије у односу на раван  $x-z$  и условом константног притиска у излазном пресеку.



**Слика 4.2.1** а) Модел струјања кроз канал продужен 3 пута узводно од улазног пресека, б) положај и ознаке карактеристичних линија пресека струјног домена са равни симетрије (линије Л1-Л6) и равни  $x-y$  (линија Л7), ц) расподела статичког притиска у равни симетрије за  $V_{ul} = 30$  m/s

Ова претпоставка има основа јер се у реалности прво успоставља струјно поље у каналу а тиме тренутно и расподела статичког притиска по зидовима канала, док услед инертности механизма преноса топлоте на зид до повећавања температуре унутрашње површине зида канала, која узрокује значајније деформисање зида, долази "са закашњењем" у односу на притисно дејство флуида. Претпостављени

профил на улазу у канал не одговара профилима брзина приказаних на слици 5.1.3 добијених експериментално за тај режим рада млинског постројења. С обзиром да је профил струјног поља на улазу у канал другачији за сваки други режим рада млинског постројења, усвојен је профил добијен на начин како је описано. Треба напоменути да је струјни профил сличан усвојеном могуће остварити системом клапни и стабилизатора струје [11]. Целокупни домен је дискретизован са 13824 хексаедрних елемената коначних запремина. Прорачуном добијено струјно поље за задату вредност  $V_{ul}$  у зони струјног домена који ограничава наш канал је интерполирано у нову мрежу коначних запремина као почетни услов струјног домена за сваки конкретан нумерички FSI прорачун интеракције структуре канала и струје која протиче кроз канал.

Минималне, максималне и вредност статичког притиска усредњене по површини зидова секције 1 за различите вредности  $V_{ul}$  дате су у табели 4.2.1. Мала разлика између ове две екстремне и усредњене вредности статичког притиска указује на униформост његове расподеле по зидовима, слика 4.2.1.ц. Са порастом  $V_{ul}$  усредња вредност статичког притиска расте до вредности од -336Pa, што је скоро половина вредности гравитационог оптерећења  $\rho gh \cdot dA = 765Pa$  посматраног као подељено у средњој површи плоче, где је  $\rho$  густина,  $h$  дебљина а  $dA$  површина елемента плоче и  $g = 9,81 [m/s^2]$  гравитациона константа.

**Табела 4.2.1** Минималне и максималне вредности статичког притиска на зидовима секције 1 за различите вредности  $V_{ul}$

$V_{ul} [m/s]$	$P_{st \max} [Pa]$	$P_{st \min} [Pa]$	$P_{st \text{ ave}} [Pa]$
10	-28	-41	-36
15	-65	-93	-83
20	-132	-166	-148
25	-207	-260	-252
30	-298	-375	-336

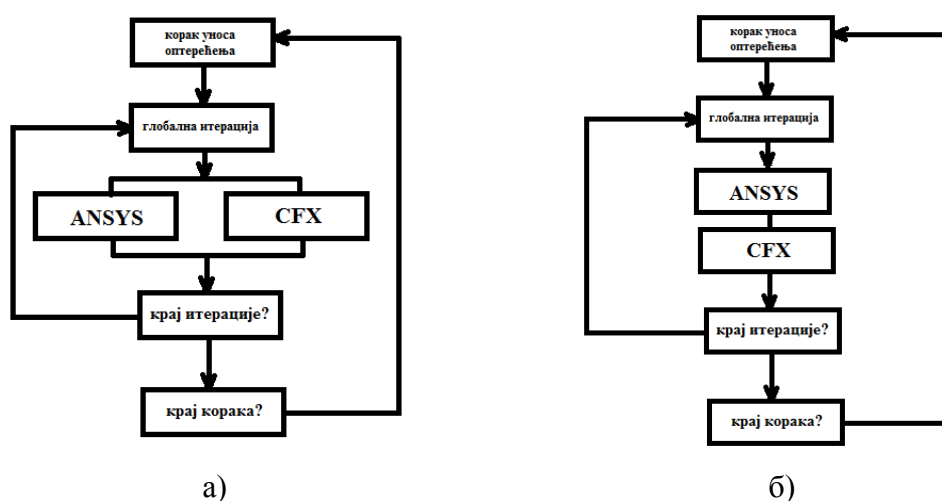
У случају када се структура канала оптерети и термичким оптерећењем, равне плоче које чине зидове канала ће заузети нове равнотежне форме, које ће даље утицати на струјно поље и расподелу притиска на зидове.

### 4.3 Спрезање нумеричких прорачуна

На слици 4.3.1 су приказана два могућа алгорита спрезања CSM и CFD прорачуна с обзиром на редослед спровођења сваког од њих и учесталост размене информација између прорачуна. У случају симултаног спровођења (слика 4.3.1a) прорачуни се спроводе истовремено а размена података се врши након завршетка текућег корака уноса за сваки од прорачуна. У случају секвенцијалног приступа (слика 4.3.1б), спроводи се прво један па други прорачун, а размена података се врши наон завршетка сваког од њих. Слабо спрегнути прорачуни могу се решавати применом симултаног спрезања (слика 4.3.1a), што омогућава краће време прорачуна и мању количину података. Јако спрегнути проблеми се морају решавати секвенцијалним приступом (сл. 4.3.1б), са већим бројем корака уноса оптерећења, јер су осетљиви на брзину и стабилност конвергенције, али су стога знатно дуготрајнији и генеришу велику количину података који су потребни за наредни корак уноса оптерећења. У многим случајевима физички процеси који се нумерички симулирају у оквиру једног прорачуна "руководе" процесима који се симулирају у другом прорачуну. Површинско оптерећење које се генерише у струји флуида на зидовима канала изазивају напонско-деформациони одговор структуре. Стога је у нашим прорачунима (поглавље 5) дефинисано да се CFD прорачун спроводи први, а на основу добијених резултата се спроводи CSM прорачун.

Алгоритам спровођења спрегнутог CSM и CFD прорачуна приказан је на сл. 4.3.2. Различити прорачуни (спрезања, CSM и CFD) размењују податке у одређеним, унапред дефинисаним тренуцима, који се зову тачке синхронизације. Прорачун чији резултати се шаљу зовемо пошиљалац а прорачун који преузима те податке прималац. Након стартовања оба прорачуна (тачка "П"), у тачки синхронизације СП1 се врши размена информација о параметрима спрегнутог прорачуна и спецификација података који се преносе кроз дефинисане површи преноса података. У тачки синхронизације почетка прорачуна СП2 се размењују подаци о мрежама, почетним оптерећењима и почетним подацима сваког од прорачуна.

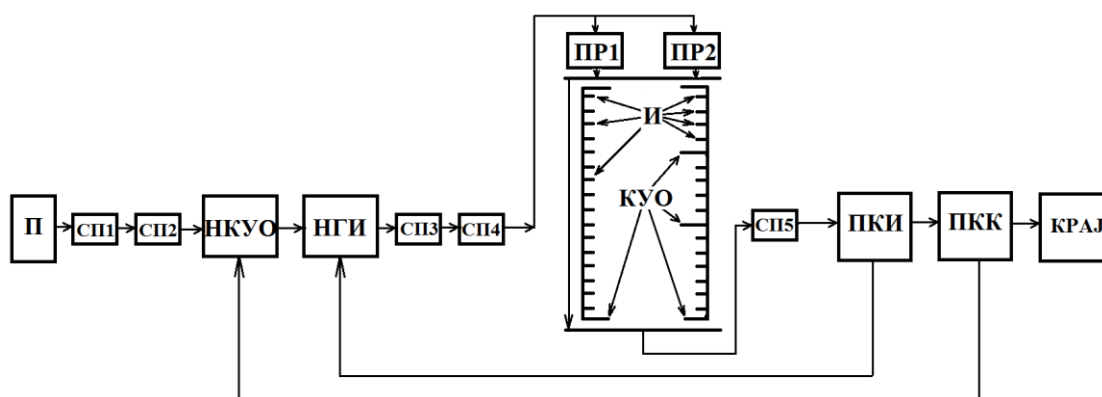
Затим се започиње нови корак уноса оптерећења спрегнутог прорачуна НКУО, који се спроводи кроз дефинисани број глобалних итерација спрегнутог прорачуна НГИ. У оквиру сваке од итерација се у тачки синхронизације СПЗ размењују информације о броју и статусу глобалних корака уноса оптерећења и итерација спрегнутог прорачуна. Затим се у тачки синхронизације СП4 размењују подаци о померањима и оптеречењима у текућој итерацији спрегнутог прорачуна и започињу прорачуни ПП1 и ПП2.



Слика 4.3.1 Начини спрезања CSM и CFD прорачуна: а) симултани, б) секвенцијални

Прорачуни се спроводе у зависности од тога која шема спрезања је одабрана (слика 4.3.1), при чему сваки од њих може бити спроведен кроз један корак уноса оптерећења КУО и већи број итерација И (лева грана за прорачун ПП1), или кроз већи број КУО и у оквиру сваког од њих већи број итерација И (десна грана за прорачун ПП2, сл. 4.3.2). Након завршетка једног (у случају секвенцијалне шеме спрезања) или оба прорачуна (у случају симултане шеме спрезања), у тачки синхронизације СП5 се врши размена информација о оствареним конвергенцијама. Сматра се да су услови конвергенције датог корака уноса оперећења испуњени ако су оба прорачуна, и CSM и CFD, остварили за њих дефинисане услове конвергенције и ако су остварени услови конвергенције преноса података између CSM и CFD прорачуна. Конвергенција размењених података је остварена када је глобална мера нормализоване промене у

вредностима размењених података између две узастопе итерације мања од задате толеранције.



Слика 4.3.2 Дијаграм спровођења спрегнутог прорачуна

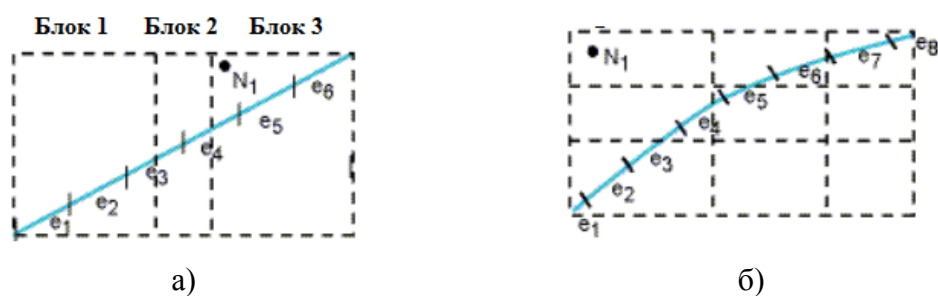
Вредност пренете величине  $\varphi$  се одређује на основу вредности те величине  $\varphi_i$  у  $i$ -том чвору из којег се пренос врши и припадајућег тежинског фактора  $w_i$  који се одређује на основу положаја сваког од  $n$  чворова као  $\varphi = \sum_{i=1}^n w_i \varphi_i$ . Током

спровођења спрегнутог прорачуна се на свим локацијама размене података, одређују две глобалне мере конвергенције: максимум и корен суме средњих квадрата (*Root Mean Square* – **RMS**) нормализованих вредности промене размењених података. Вредност **RMS** за нормализовану вредност промене размењеног податка  $\varphi$  између узастопних итерација у оквиру датог корака уноса оптерећења, на свакој од локација  $l$  које се налазе на површи раздвајања, се добија

$$\text{као } \mathbf{RMS} = \sqrt{\widehat{\Delta}_1^2} = \sqrt{\left( \frac{\Delta_l}{0,5 \cdot ((\max|\varphi| - \min|\varphi|) + |\overline{\varphi}|)} \right)^2}. \text{ Делилац у подкореној}$$

величини је фактор нормализације који се одређује као средња вредност опсега размењене величине и њене средње вредности  $\overline{\varphi}$  за све локације и у свим итерацијама током нумеричког прорачуна, чиме је избегнуто дељење са нулом. Дељеник подкорене величине представља не-нормализовану вредност промене преносене величине у две узастопне итерације, која се добија као

$\Delta_l = \frac{1}{\omega}(\varphi_l^{tek} - \varphi_l^{pret})$ , где су  $\varphi_l^{tek}$  и  $\varphi_l^{pret}$  вредности у текућој и претходној итерацији респективно, а  $\omega$  је подрелаксациони фактор који се примењује у текућој итерацији. У случају да нису остварени услови конвергенције за дати корак уноса оптерећења спрегнутог прорачуна у текућој итерацији (тачка ПКИ), започиње се са новом итерацијом спрегнутог прорачуна НГИ, узимајући да је  $\varphi^{tek} = \varphi^{pret} + \omega \cdot (\varphi_l^{tek} - \varphi_l^{pret})$ . Подрелаксација се спроводи са циљем да се олакша конвергенција у случају великих инкремената структуралног померања услед геометријске нелинеарности. Ако ти услови јесу задовољени, проверава се да ли су унети сви кораци уноса оптерећења спрегнутог прорачуна (тачка ПКК). Ако нису, започиње се са следећим кораком уноса оптерећења НКУО. У супротном се спрегнути прорачун завршава.



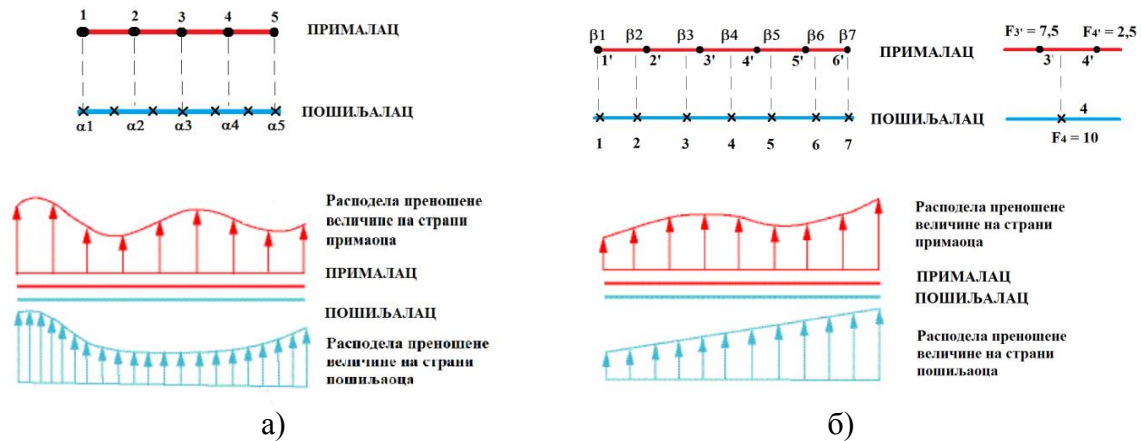
**Слика 4.3.3** Алгоритам мапирања поделом на блокове, а) када у блоку има елемената, б) када у блоку нема елемената

Сваки процес преноса података између прорачуна састоји се од алгоритамских компоненти мапирања, интерполације података и подрелаксације података пре слања примаоцу. Да би се пренела информација са једне на другу мрежу, прво је неопходно мапирати чворове једне мреже у локалне координате елемента друге мреже где ће одређена информација бити пренета. У нашем случају да би се пренела информација о померању чворова структуре, чворови елемената мреже коначних запремина морају бити мапирани на елементе љуске. Обратно, за пренос података о напонима (притиску), чворови елемента љуске морају бити мапирани у локални координатни систем елемента коначних запремина. У оквиру софтверског пакета ANSYS на располагању су глобални и модел претраге по блоковима елемената (*bucket search method*). Алгоритам првог модела



претражује све елементе друге мреже (од  $e_1$  до  $e_6$  на слици 4.3.3) и тражи најближи елемент у који би посматрани чвор прве мреже  $N_1$  могао бири мапиран. Овај поступак је осетљив на постојање размака између две мреже или њихово евентуално преклапање (слика 4.3.5). За проблеме где је број чворова једне мреже истог реда величина са бројем елемената друге, време потребно за прорачун мапирања расте са другим степеном броја чворова и постаје веома дуготрајно за мреже са већим бројем чворова и елемената. Други модел се своди на груписање елемената у блокове (Блок 1-3, слика 4.3.3а) и претрагу само елемената из блока у којем се посматрани чвор налази (у примеру на слици 4.3.3а, за чвор  $N_1$  који се налази у Блок 3 то би били елементи  $e_4$ ,  $e_5$  и  $e_6$ ), чиме се превазилази основни недостатак глобалног модела. Основу овог модела поставили су *K. Jansen, F. Shakib, and T. Hughes (Computational Nonlinear Mechanics in Aerospace Engineering, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Chapter 5, Fast Projection Algorithm for Unstructured Meshes, ISBN 1563470446, 1992.)*. У случају да посматрани блок није празан, тј. да садржи једани ли више елемената, прорачунава се вектор локалних координата елемента  $\xi$  који одговара вектору глобалних координата чвора који се мапира  $\{\hat{x}\}$  решавањем сета нелинеарних једначина изопараметарског мапирања облика  $\{\hat{x}\} = [N_a^e(\xi)]\{x_a^e\}$ , где је  $[N_a^e(\xi)]$  - матрица линеарних функција облика елемента,  $\{x_a^e\}$  - вектор глобалних координата чвора  $a$  посматраног елемента  $e$ . Када се прорачуна вектор  $\xi$  проверава се да ли је чвор  $N_1$  мапиран унутар елемента  $e$  провером услова који је за квадрилатерарне елементе са четири чвора облика  $|v_1| \leq 1 + tol$ ,  $|v_2| \leq 1 + tol$ , где су  $v_1$  и  $v_2$  компоненте вектора  $\xi$  а  $tol$  је усвојена толеранција. Између свих елемената који задовољавају горе наведене услове, мапирање се врши у онај елемент за који је растојање између чвора  $N_1$  и његове пројекције најмање. У случају постојања преклапања или размакнутости мрежа (слика 4.3.6), блок са посматраним чвором неће обухватити нити један елемент друге мреже (слика 4.3.3б). У том случају се прво лоцира најближи блок који садржи елементе и мапирање чвора се врши глобалним методом на елемент из тог блока. У прорачунима датим у поглављу 5 коришћен је метод претраге по блоковима

елемената. Неодговарајуће мапираним чворовима су сматрани они чије је релативно нормално одстојање од површи мапирања (количник стварног одстојања чвора од равни мапирања и највеће димензије блока) било веће од  $10^{-6}$ .



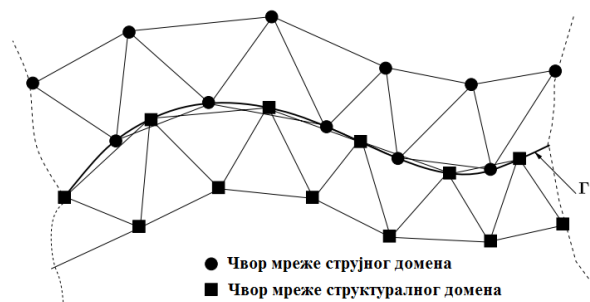
Слика 4.3.4 Модели преноса оптерећења између различитих мрежа: а) са одржањем профила преношене величине, б) глобално конзервативни модел

Постоје два модела преноса вредности физичких величина прорачунате у једном домену у прорачун који се спроводи над другим физичким доменом: интерполација са задржавањем профила просторне расподеле посматране величине, (модел МР1 сл. 4.3.4а) и интерполација са одржањем укупне вредности посматране величине (модел МР2), тзв. глобално конзервативни модел, како је приказано на слици 4.3.4б. Алгоритам модела МР1 врши мапирање сваког чвора примаоца на један од елемената пошиљаоца ( $\alpha_i$ ). Величина која се преноси се затим на изабрани начин интерполира у мапирани чвор  $\alpha_i$  као  $T_i = \varphi(\alpha_i)$ . У општем случају, применом модела МР1 притисно оптерећење ће бити пренето са приближно истим профилем расподеле али неће бити остварена једнакост сумарног оптерећења по посматраној површини, тј. није обезбеђена једнакост сила  $\int_{pošiljalac} p_1(x, y, z) \cdot \hat{n} dA \neq \int_{primalac} p_2(x, y, z) \cdot \hat{n} dA$ , где су  $p_1$  и  $p_2$  расподеле притисног оптерећења на страни пошиљаоца и примаоца респективно,  $\hat{n}$  вектор нормале површи размене оптерећења  $dA$  (слика 4.3.4а). За пренос померања са структуралног на струјни домен модел МР1 је адекватан. Алгоритам модела МР2 сваки чвор на страни пошиљаоца мапира на елемент примаоца. Преношена

величина се дели на две вредности које се уносе у чворовима примаоца (слика 4.3.4б). У случају примене модела MP2 пренос укупног притисног оптерећења као силе на посматрној површини ће бити извршен у потпуности,

$$\int_{\text{pošiljalac}} p_1(x, y, z) \cdot \hat{n} dA = \int_{\text{primalac}} p_2(x, y, z) \cdot \hat{n} dA,$$

али ће профол расподеле површинског оптерећења бити изгубљен. У студијама *Ostoich* [56] и *Roe* и др. [105] истакнуто је да се боља стабилност једног спрегнутог FSI прорачуна постиже ако се кроз површ раздвајања два различита домена преносе вредности прорачунатог притиска и термичког флуksа из струјног домена на структурални домен а истовремено са структуралног на струјни домен се преносе вредности температура и померања.



**Слика 4.3.5** Криволинијска додирна површина структуралног и струјног домена

Резултат преноса оптерећења је осетљив на различите густине мрежа на страни пошиљаоца и примаоца. У студији *Jaiman* и др. [106] је утврђено да начин преноса вредности одређене физичке величине прорачунате у чворовима мреже коначних запремина којима је дискретизован струјни домен, а који се налазе на додирној површини струјног и структуралног домена, у чворове коначних елемената којима је дискретизован структурални домен а који се такође налазе на додирној површини, може довести до генерисања грешке при преносу споменуте величине ако се дискретизационе мреже два различита домена не поклапају. Генерисање ових грешака може изазвати нестабилност нумеричког прорачуна у виду лажних осцилација и генерисања грешака у структуралном и нумеричком прорачуну струјања флуида поготово у случају када је површ додира структуралног и струјног домена криволинијска (слика 4.3.5), како су то

потврдили *Jaiman* и др. [107]. У случају модела MP1 мања грешка у преносу притисног оптерећења се остварује за  $F_{gm}^F < F_{gm}^S$ , где је густина мреже пошиљаоца (домен флуида) дефинисана са  $F_{gm}^F$  а примаоца (структурални домен) са  $F_{gm}^S$ , него обрратно. При примени модела MP2 боља интерпретација профила преносене величине се остварује за  $F_{gm}^F > F_{gm}^S$  него у обрнутом случају, иако је у оба случаја укупно оптерећење пренето у потпуности. У случају примене модела MP2 за пренос притисног оптерећења са домена флуида на домен структуре која је умрежена елементима вишег реда, при  $F_{gm}^F = F_{gm}^S$  се не може остварити коректан пренос профила притисног оптерећења (слика 4.3.6).



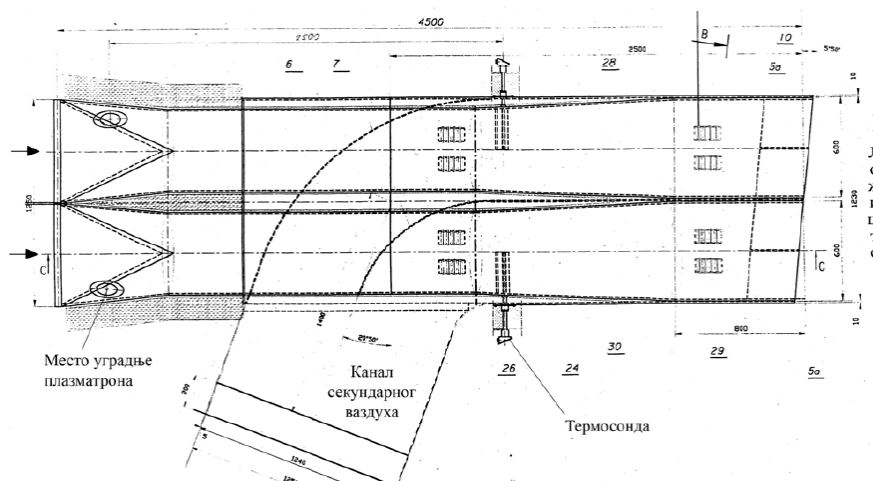
**Слика 4.3.6** Дебаланс у преносу притисног оптерећења коришћењем модела MP2 за случај  $F_{gm}^F = F_{gm}^S$  када је структурални домен дискретизован елементима вишег реда

За прорачун напонско-деформационог одговора структуре коришћен је модел уноса оптерећења описан у т.4.1.5. Пошто је унос свих врста оптерећења (гравитационо, притисно и термичко) инкрементални, прорачун новог равнотежног стања за задато термичко оптерећење (дефинисано са  $T_{un}$  и  $T_{un} - T_{sp}$ ) структуре која је била у равнотежном стању при референтној температури и која је остваривањем конвергенције у сваком од корака уноса оптерећења пролазила кроз низ равнотежних стања се своди на статички (померања се прорачунавају као функције положаја и тренутног оптерећења за посматрани корак уноса оптерећења). *Birman* и др. [60] су закључили да у случају металног панела ова два различита приступа спрезања доводе до скоро идентичних резултата као и тренутно динамичко спрезање, стим што је уштеда у времену прорачуна и до два реда величина.

## 5 Резултати истраживања

### 5.1 Резултати експерименталних истраживања

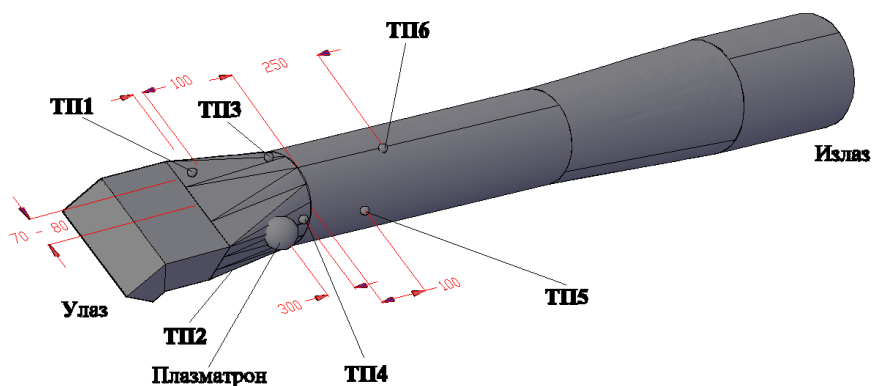
У овом поглављу су дати резултати експерименталног одређивања вредности брзина и температура струје аеросмеше у улазном пресеку у канал аеросмеше, резултати експерименталног одређивања температуре метала канала аеросмеше при раду плазматрона, резултати одређивања расподеле температуре по пресеку вртложног горионика лабораторијског постројења и извршено је усвајање опсега почетних и граничних услова нумеричких модела. Резултати приказани у овом поглављу реализовани су у оквиру Пројекта ТР 147 “Развој плазматехнологије за стабилизацију сагоревања на котловима ТЕ ложених спрашеним угљем ниске топлотне вредности” од стране сарадника Лабораторије за термотехнику и енергетику Института "ВИНЧА".



**Слика 5.1.1** Положај места уградње плазматрона и положај термопарских сонди за мерење температуре аеросмеше на горионицима млинских постројења бр. 12 и 15 термоелектране ТЕНТ-А1 (преузето из [1])

У оквиру појекта су у периоду 2005 – 2007. год. извршена опсежна мерења различитих параметара (одређивање вредности брзина и температура аеросмеше у улазном пресеку канала, одређивање температуре метала канала горионика са и

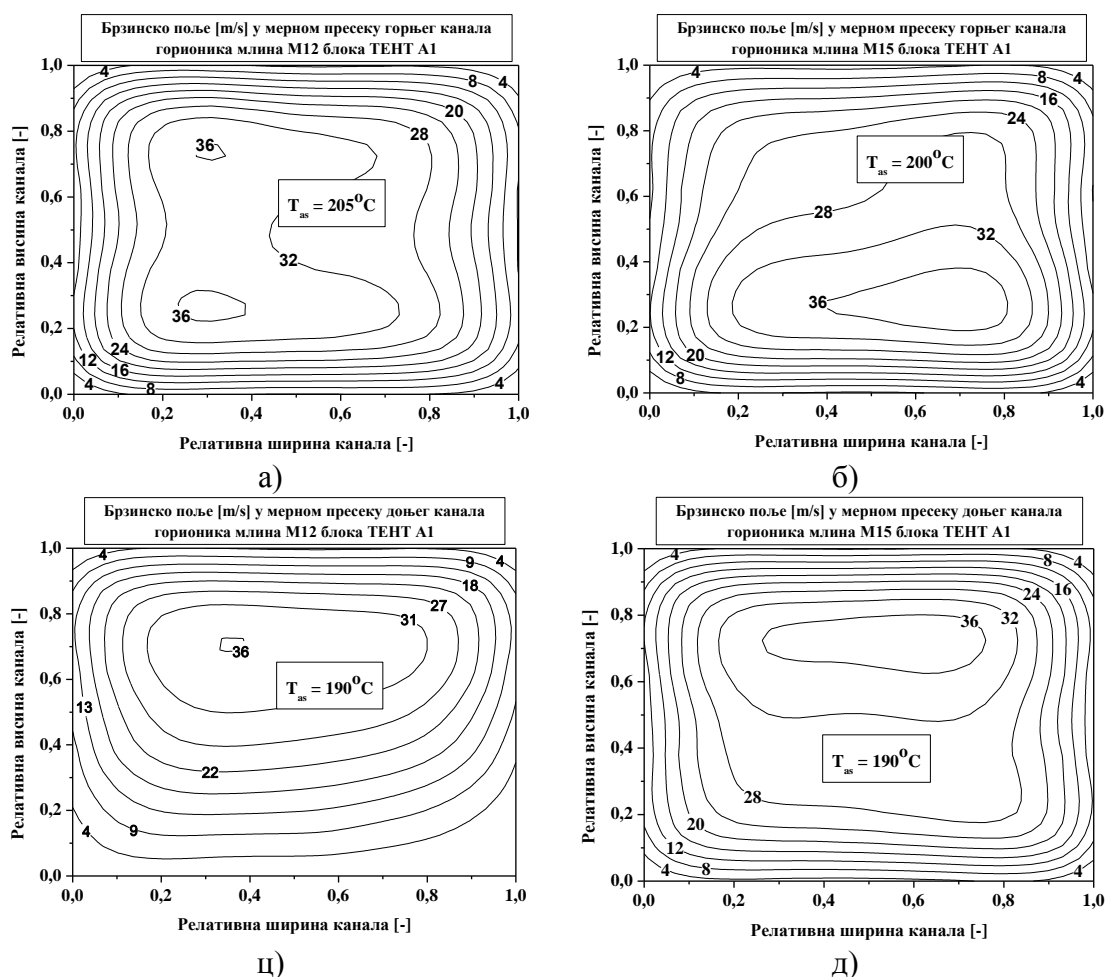
без плазматрона у раду, расподела концентрације угљеног праха по горионицима, лабораторијска карактеризација домаћег нискоквалитетног лигнита, пепела и шљаке итд). Прикупљани су бројни погонски параметри млинског и котловског постројења током испитивања. Добијени резултати експерименталних испитивања обављених на пилот-плазматронском постројењу које је било инсталирано на блоку А1 термоелектране ТЕНТ А као и резултати експерименталних испитивања обављених на лабораторијском експерименталном плазматронском постројењу са вртложним гориоником, формирају базе података у већем делу дате у [6, 9]. У овом раду ће бити приказан само део резултата извршених испитивања, од којих део до сада није публикован. Приказ шеме места уградње плазматрона на горионицима млинских постројења бр. 12 и 15 термоелектране ТЕНТ-А1 са означеним положајем термопарских сонди за мерење температуре аеросмеше дат је на слици 5.1.1. На слици 5.1.2 је приказан размештај термопарова на горионичким каналима за мерење температуре спољашње површине метала горионика. Позиције термопарова ТП1 – ТП6 уграђених на каналу 53А су аналогне позицијама термопарова ТП7 – ТП12 уграђених на каналу 54А.



*Слика 5.1.2 Положај мерних места за мерење температуре спољашње површине зида канала*

На сликама 5.1.3а - 5.1.3д су приказани резултати одређивања брзинског поља на уласку у канале аеросмеше на горионичким пакетима млинова М12 и М15 блока А1 термоелектране ТЕНТ А у Обреновцу при номиналном режиму рада додавача (капацитет 48,3 t/h) и блока пре реконструкције, обављеног 31.01.2007. Наравно,

расподела брзинског и температурског поља на улазу у канале аеросмеше директно зависи од погонских параметара млинског постројења. У овом раду нису приказани резултати свих обављених мерења.

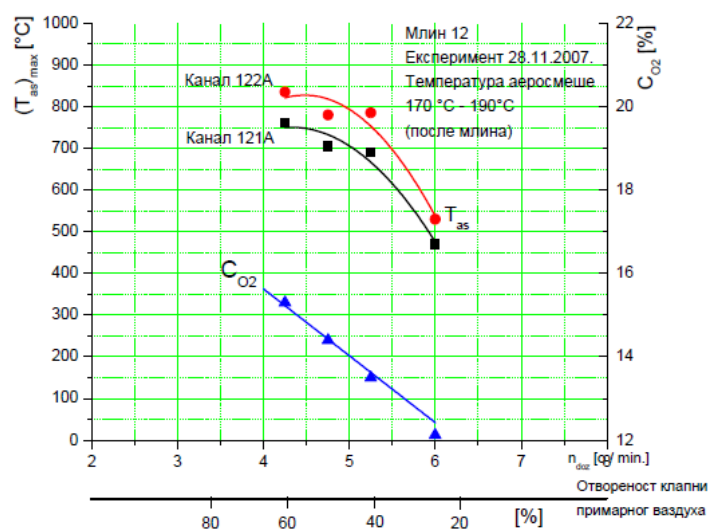


**Слика 5.1.3** Резултати мерења брзина и температуре аеросмеше у улазном пресеку канала аеросмеше млинова M12 и M15 блока A1 термоелектране ТЕНТ А

Коришћењем стандардне Пито-сонде у попречном пресеку канала аеросмеше мерени су мрежно (4 мерне осе по висини канала са по 8 мерних тачака по оси, у складу са ISO 3966:2008 стандардом) статички и динамички притисак у свакој од мерних тачака коришћењем претварача статичког и диференцијалног притиска. Термопарском сондом са дигиталним термометром мерена је температура у средини пресека канала. Видимо да је струјно поље неравномерно, повијено ка зиду канала, вредности брзина које се крећу од 10-35 m/s. Стога је изабран опсег

$V_{ul} = 10-30 \text{ m/s}$  за вредности улазних брзина у канал које ће бити коришћене у параметарској нумеричкој анализи (глава 5.3).

На слици 5.1.4 су приказани резултати мерења промене температуре плазмахемијски припремљене аеросмеше  $T_{as}$  на каналима 121А и 122А у зависности од капацитета млина М12 и садржаја кисеоника, обављена 28.11.2007. год. Положај мерног места термосонде приказан је на слици 5.1.1 и налази се око 2,5m низводно од плазматрона. У ситуацији када се температура аеросмеше иза млина одржава приближно константном (ручни режим регулације) а мења капацитет млина и отвореност клапни примарног ваздуха (експеримент 28.11.2007) у зависности од пораста концентрације кисеоника, тј. отворености клапни примарног ваздуха долази и до пораста температуре аеросмеше после плазмахемијске припреме, што је илустровано на сл. 5.1.4.

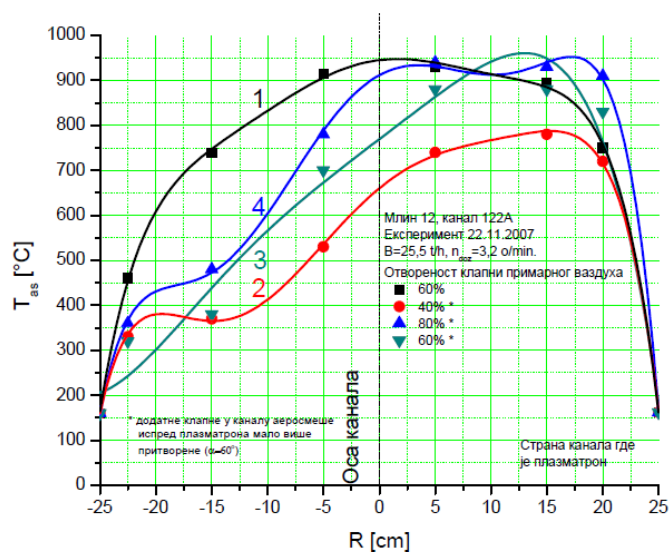


**Слика 5.1.4** Промена температуре плазмахемијски припремљене аеросмеше,  $T_{as}$  у зависности од капацитета млина и садржаја кисеоника [6]

Температура расте од око 500°C до скоро 850 °C у зависности од положаја клапне и са слике 5.1.4 видимо да тек са повећањем отворености клапни изнад 40% долази до бурнијег и потпунијег сагоревања аеросмеше после плазматрона и постизања максималних температура аеросмеше, изнад 700 °C када се и може говорити о успешности процеса плазмахемијске припреме угљеног праха.



Мерења профила температуре на месту уградње термосонди (слика 5.1.1) показали су да је он углавном асиметричан са максималним вредностима према зиду канала на страни уграђених плазматрона. Узрок овоме је снажан утицај основне струје аеросмеше која се креће релативно великом брзином прибијајући бочну плазмену струју уза зид, тако да потпални фронт не успева да се прошири по целом пресеку канала. На сл. 5.1.5 дат је изглед измерених профила на каналу 122А (млин 12, канал са десне стране – А (експеримент обављен 22.11.2007) [6].



**Слика 5.1.5** Профили температуре аеросмеше  $T_{as}$  у горионичком каналу после плазматрона [6],  $R$  – удаљење од осе канала

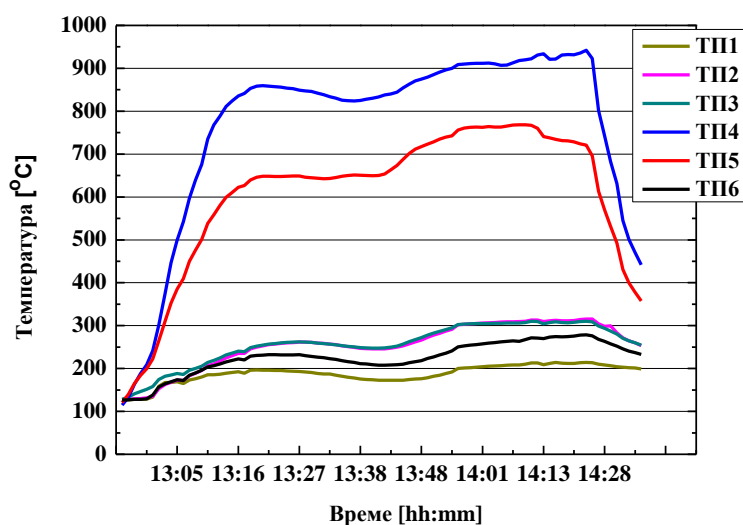
Ради превазилажења проблема ниске средње вредности концентрације у појединим каналима и изразито неповољне расподеле концентрације угљеног праха у пресеку уградње плазматрона израђене су специјалне покретне преграде – клапне. Захваљујући њима било је могуће остварити расподеле профила  $T_{as}$  дате на сл. 5.1.5. При оптималном углу постављања преграда-клапни  $\alpha \sim 45^\circ$  било је могуће остварити добро скретање и потпаљивање аеросмеше које се низводно пренело на скоро цео попречни пресек канала (крива 1 на сл. 5.1.5).

Као један од веома битних закључака студије [6] истакнуто је да се у циљу успешног одвијања плазмахемијске припреме мора посветити посебна пажња добром мешању аеросмеше путем уградње специјалних турбулизатора као и

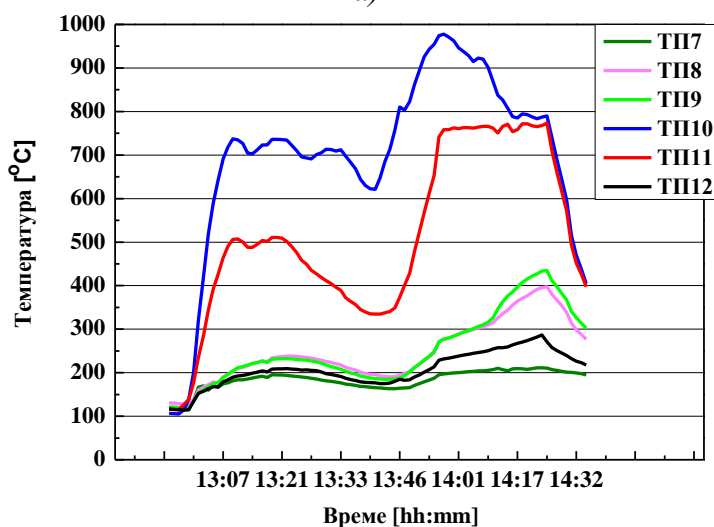
двостепеног или вишестепеног процеса потпаљивања аеросмеше. Код оваквих конструкција основна струја аеросмеше једног горионичког канала дели се на два или више делова где се процес потпаљивања одвија најпре у првом делу канала којим бива обухваћено до 30% протока угљеног праха а затим низводно сукцесивно и остали делови аеросмеше односно угљеног праха. Том приликом треба имати у виду да уградња турбулизатора за мешање и хомогенизацију аеросмеше као и дељење протока аеросмеше на делове условљава додатно повећање аеродинамичког отпора горионичког канала. Такође, мора се водити рачуна и о чињеници да излазна температура аеросмеше може достигати 1000-1200 °C и да се маса гасне фазе аеросмеше том приликом повећа за 20-30% што ће условити значајно повећање брзине аеросмеше, односно појавиће се додатни аеродинамички отпор који може износити више стотина паскала.

Испитивање рада пилот - плазматронског постројења вршена су у периоду 2006 - 2008 године. Мерење температуре метала реконструисаних горионика у режиму рада плазматрона PL 53A и PL 54A са угљем, бочно уграђених у улазним пресецима канала аеросмеше 153A и 154A млина 15 блока ТЕНТ А1, обављено је 14.02.2007. коришћењем термопарова тип К утиснутих у спољашњу површину зида канала и аквизиционог система HAWLETT PACARD. Капацитет додавача млина се кретао у опсегу 25-45 t/h, струја на плазматронима је регулисана у опсегу 260-300A, параметар раздвајања аеросмеше клапнама на горњи и доњи горионик је био 1,25. Плазматрон PL 53A стартован је у 12:56 а плазматрон PL 54A у 12:59. Добијени резултати су приказани на слици 5.1.2. при чему су се термопарови TC1 – TC6 налазили на каналу 153A, а термопарови TC7 – TC12 на каналу 154A. Плазматрон ПЛ 54A је у овом експерименту стартован 3 минута касније од плазматрона ПЛ 52A. На онову добијених резултата се може приметити да убрзо по старту плазматрона температура зида канала почиње да расте и у одређеним зонама достиже вредности и преко 900°C, што је приближно добијено и нумеричким прорачунима [66]. У 13:02 млин је радио са оптерећењем од 25t/h, плазматрони при струји од 260A. Оптерећење млина је повећано на 35t/h у 13:10, а затим на 45t/h у 13:21. Струја на плазматронима је у 13:44 подигнута на 280A. Због великог пораста температуре аеросмеше на 370oC, капацитет млина је

оборен на 35t/h и снижена струја на плазматронима на 300А. У 14:25 је угашен плазматрон ПЛ 53А а плазматрон ПЛ 54А је угашен у 14:27. Видимо да је температурно поље на спољашњој површини зида канала веома неунуформно и мења се у зависности од режима рада плазматрона и млина (слика 5.1.6). Најоптерећеније зоне структуре канала при овом експерименту су биле зоне положаја термопарова ТП4 и ТП5 на каналу 153А и зоне положаја термопарова ТП10 и ТП11 на плазматрону 154А (слика 5.1.2).



a)



б)

Слика 5.1.6 Резултати мерења температуре метала горионика на каналима аеросмеше млина 15 блока ТЕНТ А1 а) канал 153А и б) канал 154А

## Резултати истраживања

---

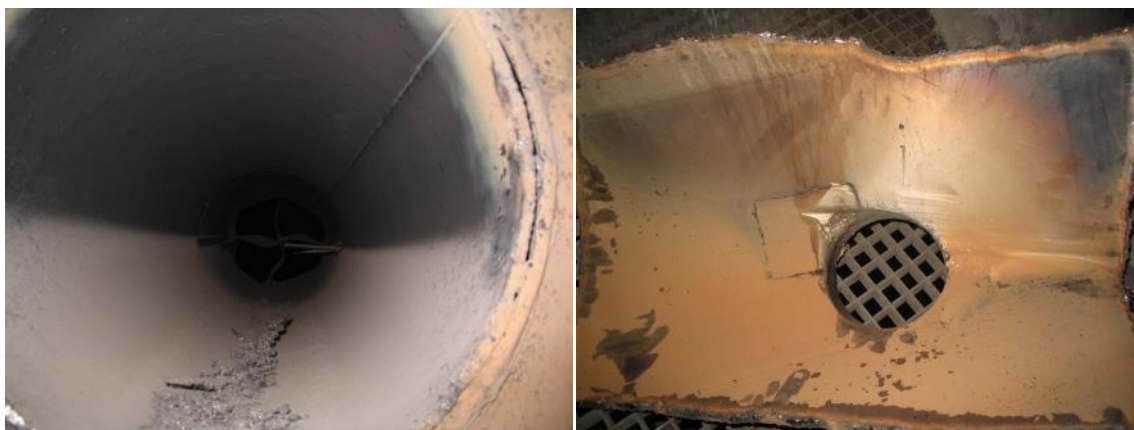
Доминантни механизам преноса топлоте на зид канала је радијација плазменог лука, чије дејство је ограничено на релативно узану зону на зиду канала низводно од плазматрона као последица повијања плазменог језгра низ струју аеросмеше.

Значајна површина канала се за време трајања испитивања није загрејала више од  $450^{\circ}\text{C}$  (сл. 5.1.2 и 5.1.6). Основни разлози су постојање хлађења секундарним ваздухом (сл- 5.1.1) и неповољни услови конвективног преноса топлоте.



а)

б)

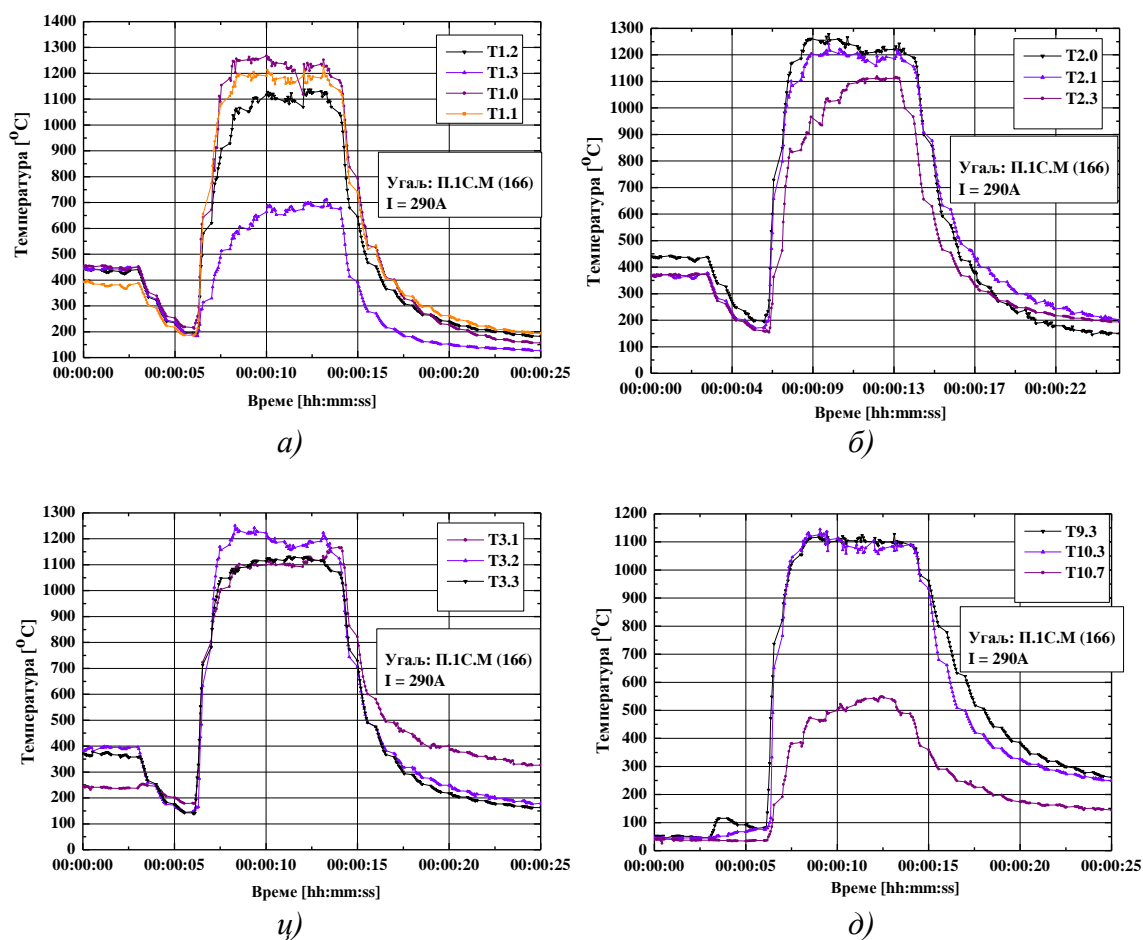


ц)

д)

**Слика 5.1.7** Изглед канала концепције ЦГ након периода од годину дана рада, поглед из унутрашњости канала: а) излазни дела канала 153А, б) излазни дела канала 154А, ц) унутрашњост дела канала низводно од плазматрона, д) део канала са отвором за смештај плазматрона

Такође, потврђен је избор концепције канала ЦГ, али и чињеница да повијени млаз плазме не преноси велику количину топлоте радијацијом кроз аеросмешу на супротан зид канала. На сликама 5.1.7а и 5.1.7б је приказана унутрашњост излазног дела канала 153А и 154А (улаз у котло) након рада од преко годину дана, и великог броја експеримената са плазматронским системом.

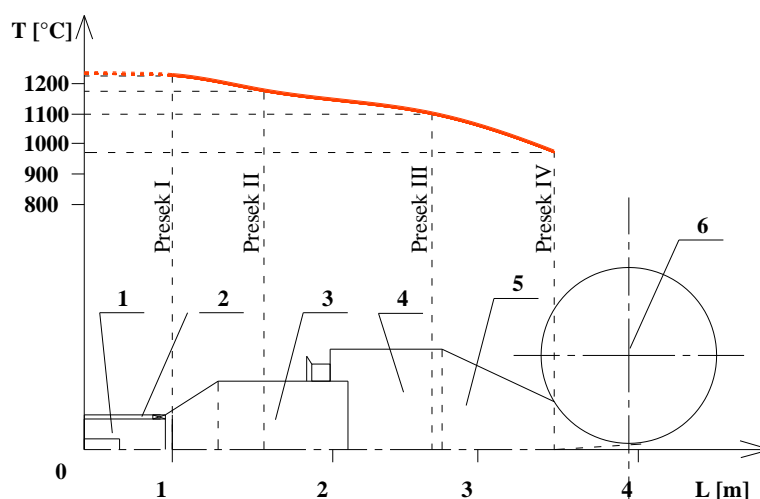


**Слика 5.1.8** Резултати мерења температуре аеросмеше у излазним пресецима лабораторијског плазма постројења са вртложним гориоником обављена 09.02.2011. а) температура у излазном пресеку II степена горионика (мерна оса 1 - вертикална), б) температура у излазном пресеку II степена горионика (мерна оса 2 - хоризонтална), ц) температура на средини III степена горионика (мерна оса 3), д) температура у излазном делу секције IV

На слици 5.1.7ц је приказана унутрашњост дела канала низводно од плазматрона. Видимо да канал није претрпео приметна оштећења, док су излазни крст и сам излазни пресек веома деформисани услед термичког напрезања. Слика 5.1.7д

приказује део канала са отвором за смештај плазматрона. Виде се трагови оштећења које је нанео повијени плазменим лук након што је накнадно постављени слој ватросталног бетона са унутрашње стране зида прелазне секције канала где се уграђују плазматрони, дебљине  $\delta \approx 20\text{mm}$ , оштећен и уклоњен ерозијом и вибрацијама канала.

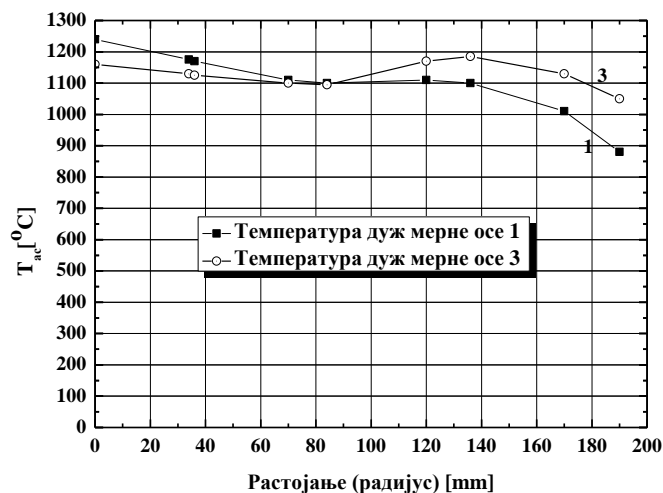
На лабораторијском постројењу са вртложним гориоником приказаним шематски на слици 1.5, а у изведеном стању заједно са управљачким и аквизиционим рачунарским системом приказаним на слици 1.3, су вршена испитивања са угљевима различитог квалитета и гранулације, варирајући брзине додавача, протоке ваздуха и струјних параметара плазматрона. Због малог капацитета бункера и додавача експеримент не траје довољно дуго (до 30s) да би било сврсисходно мерити температуру зида излазног канала на овој инсталацији.



**Слика 5.1.9** Расподела температуре аеросмеше  $T_{as}$  дуж подужне осе горионика. 1 - канал горионика I и II степен; 2 -канал довода секундарног ваздуха; 3 - канал горионика III степена; 4 - канал горионика IV степена; 5 - прикључак - уводник у скрубер; 6 -центрифугални скрубер

Добијени резултати при опиту број 12 обављеном 09.02.2011. приказани су на слици 5.1.8. Распоред мерних места приказан је шематски на слици 1.5. Резултати мерења температуре аеросмеше по унутрашњем пресеку канала  $T_{as}$  дати су као расподела температуре дуж подужне осе горионика (слика 5.1.9) и расподела температуре дуж попречне осе (радијуса) плазматронског вртложног горионика

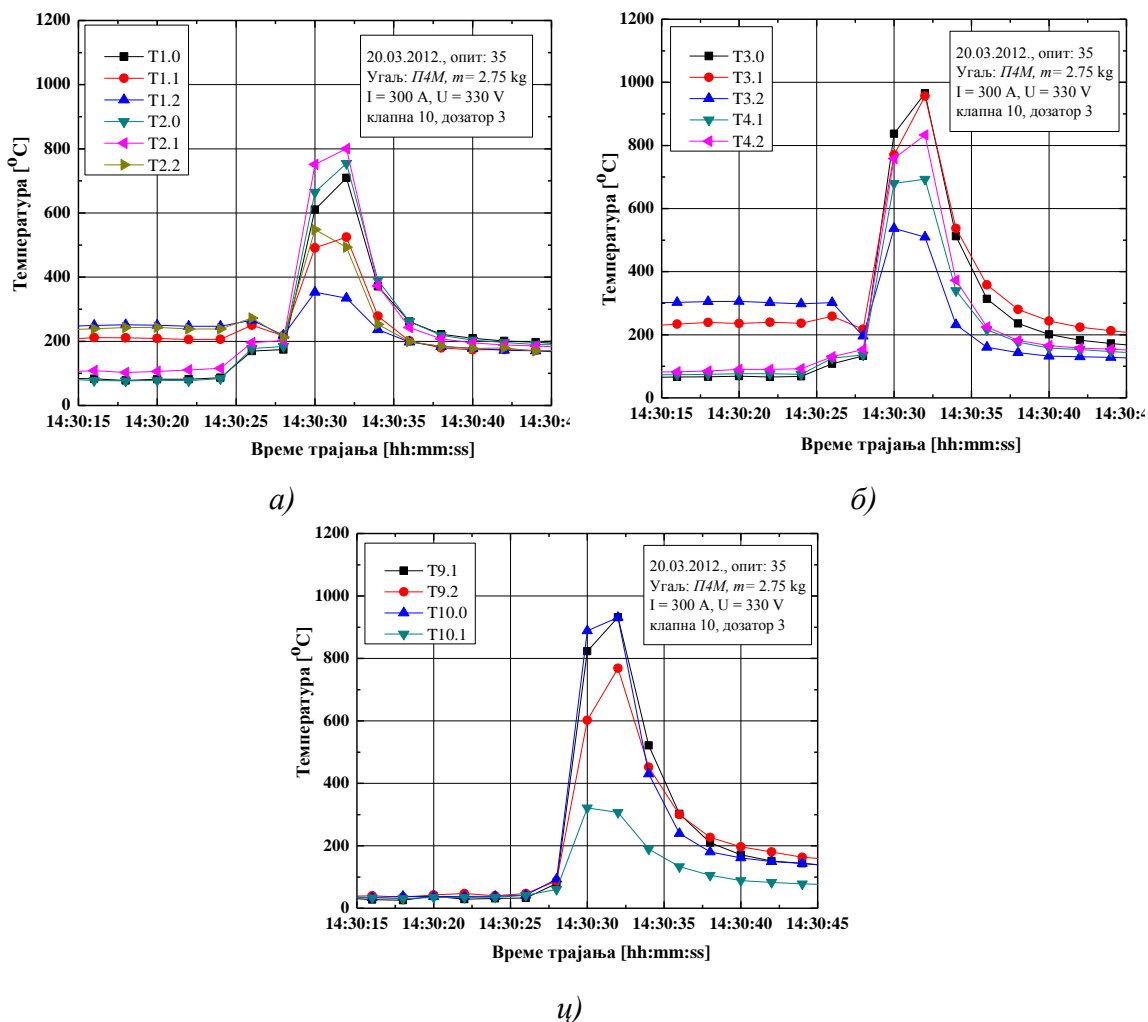
(слика 5.1.10). Део резултата ових испитивања да је у [65]. На слици 5.1.9 оса  $L$  означава растојање од плазматрона дуж подужне осе горионика у метрима.



**Слика 5.1.10** Расподела температуре аеросмеше  $T_{ас}$  дуж попречне осе (радијуса) плазматронског вртложног горионика: крива 1 - температура у излазном пресеку II-гог степена горионика (пресек I, мерна оса 1) и крива 3 - температура на средини III-ћег степена горионика (пресек II, мерна оса 2)

Као што се види са слике 5.1.8, при овом експерименту су остварене вредности температуре аеросемше и преко  $1200^{\circ}\text{C}$  у излазном пресеку II степена горионика што указује на то да је увелико започео процес сагоревања, што није пожељно. При различитим процесним условима остварују се различите температуре у пресецима горионика, које могу бити и значајно ниже, као што је то случај при опиту број 35, обављеног 20.03.2012. где су вредности постигнутих температура аеросмеше биле око  $800^{\circ}\text{C}$  у излазном пресеку II степена горионика, при чему се вредности температуре повећавају с удаљењем од плазматрона али остају испод  $1000^{\circ}\text{C}$  на средини III-ћег степена горионика (слика 5.1.11). При сваком опиту мерен је и пораст статичког притиска у излазном пресеку II степена горионика. Добијене вредности веома варирају у зависности од задатих параметара процеса. На основу до сада обављених мерења усвојено је да параметар температура унутрашње површине зида канала  $T_{un}$  узима вредности од  $170-700^{\circ}\text{C}$ , а параметар  $T_{un} - T_{sp}$  од  $0-600^{\circ}\text{C}$ . Основни разлог за то је тај што више температуре канала аеросмеше значајно утичу на његов радни век али и указују на то да преовлађује појава сагоревања угљеног праха у самом каналу, што се у експлоатационим

условима мора избећи. Ниже вредности температуре  $T_{un}$  од  $170^{\circ}\text{C}$  нису од значаја са становишта радних режима млинског постројења.



**Слика 5.1.11** Резултати мерења температуре у излазним пресецима горионика, опит број 35 обављен 20.03.2012.: а) температура у излазном пресеку II степена горионика, б) температура на средини III степена горионика, ц) температура у излазном делу секције IV



## 5.2. Резултати нумеричких прорачуна

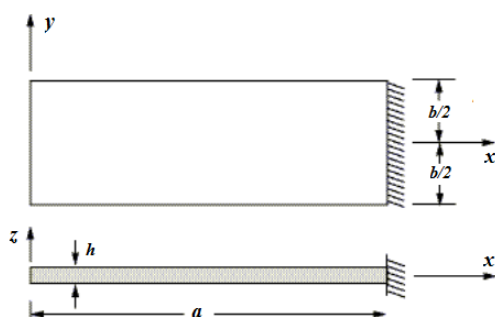
На елемент канала правоугаоног попречног пресека истовремено делују гравитационо оптерећење, притисно дејство флуида и претпостављено термичко оптерећење које зависи од вредности температуре на унутрашњој површини плоче и разлике у температурама унутрашње (обливане, у додиру са струјом флуида) и спољашње површине плоче. Услови оптерећења које делује на плоче су различити. На елемент "хоризонталне" плоче делује притисно оптерећење флуида ( $p \cdot dA$ , где је  $dA$  – површина посматраног елемента плоче,  $p$  - статички притисак флуида) промењиво током деформисања плоче услед успостављања новог струјног поља; компонента гравитације нормална на средњу раван плоче ( $dG_n = \rho gh \cdot dA \cdot \cos(\alpha)$ , где је  $g$  – гравитационо убрзање,  $\rho$  – густина плоче,  $h$  – дебљина плоче,  $\alpha$  – угао који тангента на средњу раван посматраног елемента заклапа са правцем дејства гравитације, промењив са деформацијом плоче, те је стога и ова компонента промењива током деформисања плоче); компонента гравитационе силе која делује у средњој површи посматраног елемента плоче ( $dG_t = \rho gh \cdot dA \cdot \sin(\alpha)$ , промењива током деформисања). Термички изазвани напони су последица расподеле температурног поља у структури (које је претпостављено као униформно по површини и линеарно кроз попречни пресек плоче) и спречености елемента плоче да се шири у правцима који чине тангетну раван на средњу површ плоче. Ширење у правцу нормалном на средњу раван плоче по ивицама плоче је спречено граничним условима ослањања. При томе су геометријске карактеристике и услови ослањања сваке од плоча које чине структуру канала различити.

Термички изазвани губитак стабилности се јавља у случају униформне расподеле температуре по површи плоче и спречености плоче да се шири у бар једном од праваца средње равни плоче. У случају неуниформне расподеле долази до испупчавања без губитка стабилности. Један од циљева овог рада је био да се идентификују услови евентуалног појављивања губитка стабилности (термичко оптерећење и брзина струје). Прву секцију правоугаоног канала чине 4 укљештене танкозидне плоче, у неким од анализираних случајева термички оптерећене

униформно по целој запремини ( $T_{un} - T_{sp} = 0$ ), што сугерише на могућност појаве термички индуковане нестабилности. Положај канала у простору (дејство гравитационе силе) те притисно оптерећење струје кроз канал донекле смањују ову могућност, иницирајући да се плоче савијају / испупче пре него што дођу у ситуацију да се извију. Ситуација је сасвим другачија за вертикалне плоче, на које гравитација делује у равни средње површи плоче и чија је површина мања, а однос  $a/b$  значајно већи.

### 5.2.1 Својствене вредности и форме вибрација модела коначних елемената

У овом поглављу су анализирани резултати одређивања својствених вредности и издвојених форми природних вибрација за различите проблеме.



ТЕСТ 1

$$a = 0,4064 \text{ m}$$

$$b = 0,1016 \text{ m}$$

$$h = 0,0254 \text{ m}$$

$$E = 2,07 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

$$\rho = 7780 \text{ kg/m}^3$$

$$\nu = 0$$

*Слика 5.2.1.1 Геометријске карактеристике равне правоугаоне плоче коришћене у примеру ТЕСТ1 одређивања природних фреквенција латералних вибрација плоче  $f$ , пример из [95], стр. 338, поглавље 53*

До губитка стабилности долази и у случају евентуалног постојања локализоване зоне са значајно већом температуром од остале површине плоче ("hot spot") тј. када се термички индуковани напони јављају у малој области у односу на остатак структуре [21]. Овакав случај у нашем случају може да се појави у зони наспрам плазматрона који генерише плазмени лук високе температуре и интензивне радијације али га у овим прорачунима занемарујемо. Коришћењем одговарајућих решења сингуларних проблема као основе за формирање *Green* – ове функције посматраног проблема, могуће је било какав облик расподеле термичког

оптерећења представити у форми интеграла појединачних доприноса и наћи решење за тај случај [21].

а) Канал се састоји од равних плоча различитих геометријских карактеристика и граничних услова ослањања. На примеру правоугаоне плоче укљештене на једној страни, геометрије приказане на слици 5.2.1.1, испитани су утицаји примене различитих типова коначних елемената, густина нумеричке мреже као и различитог броја коначних елемената по дебљини плоче на добијени резултат, који је упоређен са аналитичким решењем датим у [95], стр. 338, поглавље 53. Пример је означен као ТЕСТ 1. Нумеричка мрежа коначних елемената је формирана са  $1 \cdot F_{gm}^S$  елемената по ширини и  $4 \cdot F_{gm}^S$  елемената по дужини плоче. За прорачун својствених вредности  $f_i$  система коначних елемената и одвајање својствених вектора померања чворова који представљају својствену форму (мод вибрације) својствене вредности коришћен је *Block Lanczos*-ов метод (т.4.1.6).

Резултати добијени прорачуном ТЕСТ1 за пример приказан на слици 5.2.1.1 дати су у табели 5.2.1.1. као реалтивно одступање резултата добијених нумеричком методом коначних елемената  $f_1^{num}$  од аналитичке вредности,  $f_1^{an} = 128,09\text{Hz}$ ,

према изразу:  $\left( \frac{f_1^{num}}{f_1^{an}} - 1 \right) \cdot 100$  [%]. Релативна грешка резултата нумеричких

прорачуна ТЕСТ1 је мања од 0,3% сем за случај са ЕТ4 и  $F_{gm}^S = 1$ , али већ при  $F_{gm}^S = 4$  пада на испод 0,3%. Видимо да најбоље резултате даје елемент ЕТ1 док најлошије резултате добијамо коришћењем елемента ЕТ4.

Није примећена промена вредности  $f_i$  са променом БЕ по дебљини плоче ни за један од анализираних елемената, што је и очекивано с обзиром да својствене вредности  $f_i$  зависе од матрице крутости и матрице маса формираног система коначних елемената (т.3.5), које опет зависе од положаја коначног елемента у простору, те да је дебљина плоче значајно мања од осталих димензија. Такође, коришћењем било *Subspace* или *Block Lanczos* метода за издвајање својствених вредности добијене су идентичне вредности  $f_i$ ,  $i = 1, 20$  за посматрани модел

коначних елемената, без обзира на тип коришћеног елемента или вредности  $F_{gm}^S$  и БЕ.

**Табела 5.2.1.1** Одступање у [%] вредности прве својствене фреквенције  $f_1$  плоче приказане на слици 5.2.1.1, у односу на аналитичко решење  $f_1^{an} = 128,09\text{Hz}$  дато у примеру у референци [95], стр. 338, поглавље 53

$F_{gm}^S$	релативна грешка $\left(\frac{f_1^{num}}{f_1^{an}} - 1\right) \cdot 100$ [%]			
	Тип коначног елемента			
	ЕТ1	ЕТ2	ЕТ4	ЕТ5
1	0,14	-0,14	-6,76	-0,21
4	0,01	-0,18	-0,17	-0,25
8	0,01	-0,18	-0,23	-0,25

Резултати прорачуна проблема одређивања природних фреквенци и својствених облика слободно ослоњене плоче геометријских карактеристика као што је "хоризонтална" плоча секције 1 нашег канала дати су у табели 5.2.1.2. Карактеристике плоче су:  $a = 1,875\text{m}$ ,  $b = 1,23\text{m}$ ,  $h = 0,01\text{m}$ ,  $\rho = 7800\text{kg/m}^3$ ,  $E = 203 \cdot 10^9 \text{ Pa}$ ,  $\nu = 0,3$ . Прорачуни су означени са ТЕСТ 1а. Модели су формиран од два типа коначних елемената ЕТ2 и ЕТ4, са идентичним дискретизационим мрежама са по 40 елемената у правцу у осе и 30 елемената у правцу  $x$  осе, чиме су добијени скоро квадратни коначни елементи дискретизационе мреже димензија  $6,15 \cdot 10^{-2} \times 6,25 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ . Координатни почетак је смештен у средиште плоче, са  $x$  осом у правцу дуже стране плоче. Добијени резултати су упоређени са аналитичким решењем датим у реф. [113], стр. 481-502, као

$$f_{m,n} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{D}{\rho h} \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)},$$

преко приказаних оступања сваког од прорачуна  $\Gamma_{ET} =$

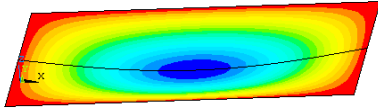
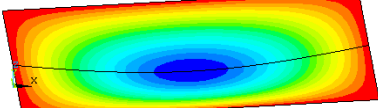
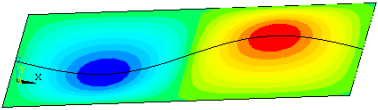
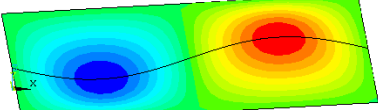
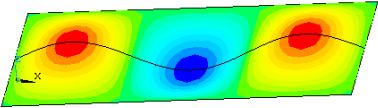
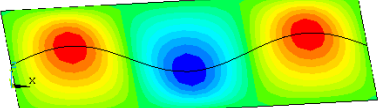
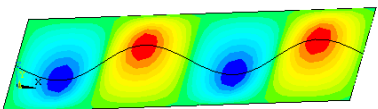
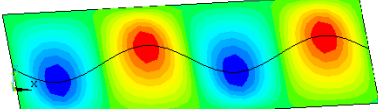
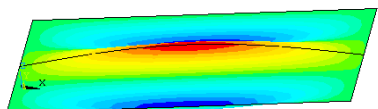
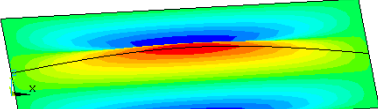
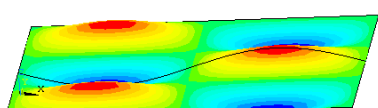
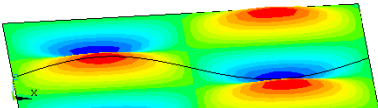
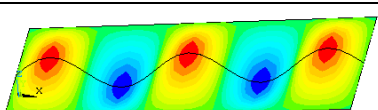
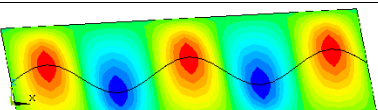
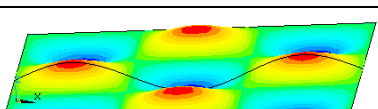
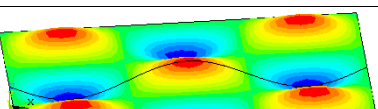
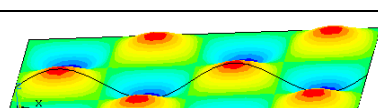
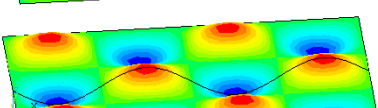
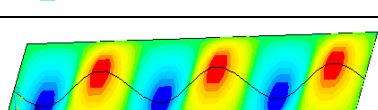
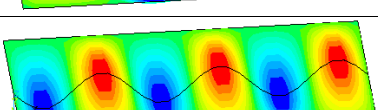
$100 \cdot (f_{ET} / f_{m,n} - 1)$  у односу на аналитичко решење  $f_{m,n}$ , при чему је

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} = 1,859 \cdot 10^4 \text{ [Nm]} - \text{крутост плоче на савијање. Мод означен са } (m,n)$$

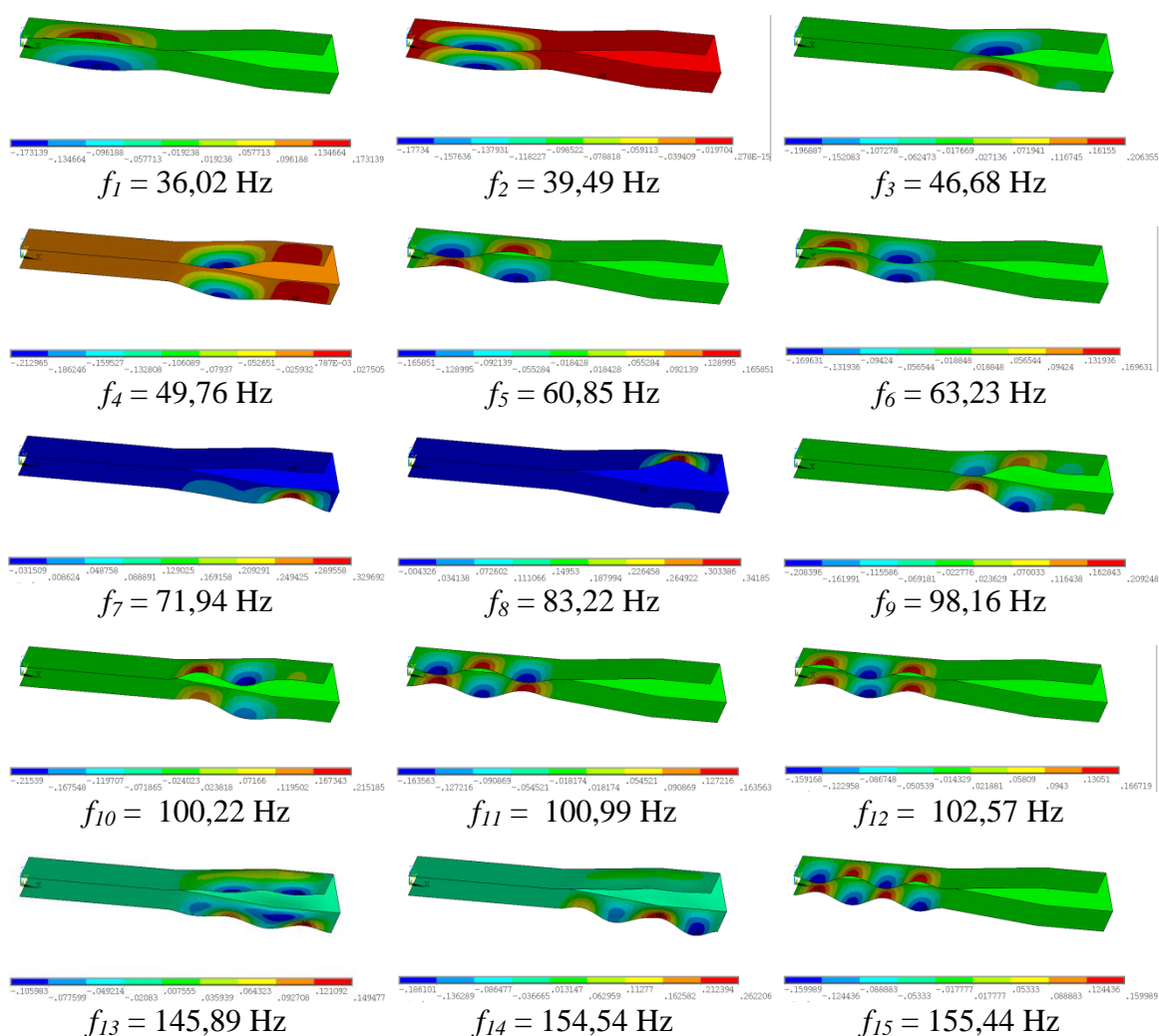
означава својствени облик формиран од  $n$  полуталаса у правцу  $x$  осе и  $m$  полуталаса у правцу у осе. Резултати показују да је остварена грешка у прорачуну вредности природних фреквенција за прва два мода нижа у случају модела са ЕТ4, али да расте при вишим модовима и до 4,2%, док грешка у случају модела са ЕТ2

не прелази 1%. Такође примећујемо да су другачији облици добијени за модове (2,3), (3,3) и (4,3), који су симетрични у односу на раван  $x$ -у.

**Табела 5.2.1.2** Резултати прорачуна ТЕСТ 1а упоредо са аналитичким решењем датим у [113], стр. 481-502

МОД ( $m,n$ )	$f_{m,n}$ [Hz]	$\Gamma_{ET2}$ [%]	$\Gamma_{ET4}$ [%]	облик мода ET2	облик мода ET4
(1,1)	22,93	-0,60	-0,15		
(2,1)	43,62	-0,64	0,01		
(3,1)	78,11	-0,57	0,58		
(4,1)	126,39	-0,53	1,48		
(1,3)	151,16	-0,46	2,23		
(2,3)	171,85	-0,59	1,88		
(5,1)	188,47	-0,52	2,69		
(3,3)	206,34	-0,70	1,64		
(4,3)	254,62	-0,85	1,72		
(6,1)	264,35	-0,52	4,21		

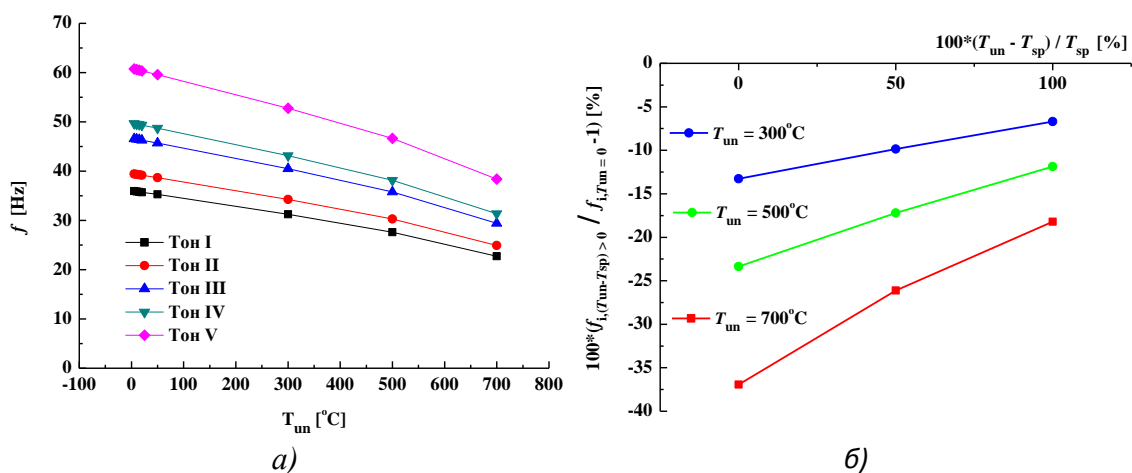
б) Првих 15 својствених форми термички неоптерећене структуре канала дискретизоване мрежом коначних елемената типа ET2 са  $F_{gm}^S = 2$ , број елемената по дебљини плоче ЕД = 1, и BC7 приказани су у таб. 5.2.1.2. Видимо да својствени облици осциловања структуре са повећањем температуре  $T_{un}$  остају непромењени, док се смањује вредност својствених фреквенци  $f_i$  за сваки од својствених облика осциловања.



**Слика 5.2.1.2** Првих 15 својствених форми вибрација приказане преко померања у правцу  $z$  – осе за  $T_{un} = T_{sp} = T_{ref}$  и вредности својствених фреквенци  $f_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 15$  неоптерећене структуре канала

Добијене својствене форме вибрација за "хоризонталне" плоче секција 1 (тонови 1, 5 и 11) и секције 2 (тонови 3 и 9) су у сагласности са облицима добијеним у [79]

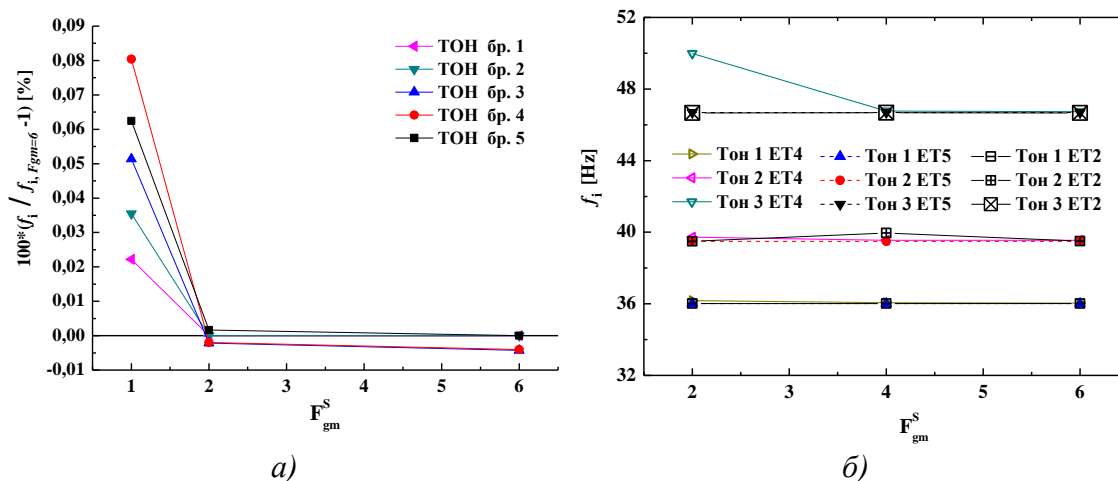
за плочу веома сличних геометријских карактеристика. Прва три тона се развијају у плочама секције 1 као највиткијим и стога најподложнијим извијању, док се четврти тон појављује као извијање "хоризонталних" плоча секције 2.



**Слика 5.2.1.3** а) промена својствених фреквенци  $f_i$  првих пет тонова са повећањем  $T_{un}$  при  $(T_{un} - T_{sp}) = 0$ , б) промена својствених фреквенци при промени  $(T_{un} - T_{sp})$  за  $T_{un} = 300, 500$  и  $700^\circ\text{C}$ .

Плоче које чине зидове канала су оптерећене истовремено спољашњим оптерећењем које изазива механичко напрезање у средњој површи плоче као и термичким оптерећењем које изазива термички индуковане напоне у средњој површи плоче. Промена својствених фреквенци  $f$  [Hz] са температуром за првих пет тонова термички оптерећене структуре при  $T_{un} - T_{sp} = 0^\circ\text{C}$  приказана је на слици 5.2.1.3а. Са повећањем  $T_{un}$  вредности својствених фреквенци  $f$  опадају за сваки од посматраних тонова, што је у сагласности са закључцима датим у [78]. Са уносом термичког оптерећења генерише се термички индуковано напонско поље које смањује крутост канала, што се манифестује смањењем природних фреквенци структуре са повећањем температуре. При нижим температурама то смањење је мање ( $0,0160 \text{ Hz}/^\circ\text{C}$  за  $T_{un} = 5^\circ\text{C}$ ) и расте са повећањем вредности температуре ( $0,0244 \text{ Hz}/^\circ\text{C}$  за  $T_{un} = 700^\circ\text{C}$ ). Са повећањем разлике температура унутрашње и спољашње површине плоча канала ( $T_{un} - T_{sp} = 0, 50$  и  $100\%$  од  $T_{un}$ ) вредност својствених фреквенци  $f_{i, (T_{un} - T_{sp}) > 0}$  за сваки од посматраних тонова  $i=1,15$  расте (слика 5.2.1.3б). При томе, са повећањем температуре  $T_{un}$  расте и релативна разлика својствене фреквенце при посматраном  $(T_{un} - T_{sp})$  и својствене

фреквенце при  $T_{un} = 0$ , изражена у процентима као  $100 \cdot (f_{i,(T_{un} - T_{sp}) > 0} / f_{i,T_{un} = 0} - 1)$ , достижући преко 30% за  $T_{un} = 700^\circ\text{C}$  и  $(T_{un} - T_{sp}) / T_{un} = 0$ . Релативна промена  $f_i$  сваког тона за исту вредност  $T_{un}$  и  $(T_{un} - T_{sp}) / T_{un}$  је скоро идентична, гледано у процентима у односу на вредност  $f_i$  за тон са  $(T_{un} - T_{sp}) = 0^\circ\text{C}$ . Оваква промена вредности својствених фреквенци  $f$  услед промене крутости структуре изазване уносом спољашњег запреминског оптерећења такође је забележена и у студији [97]. Промена вредности  $f_i$  модела коначних елемената за првих 5 тонова са променом  $F_{gm}^S$  релативно у односу на вредност  $f_i$  при  $F_{gm}^S = 6$ , за модел са мрежом коначних елемената тип ET5 са једним елементом (BE=1) по дебљини плоче  $h$ , приказана је на слици 5.2.1.4.а. Са повећањем  $F_{gm}^S$  вредности  $f_i$  брзо конвергирају и већ при вредности  $F_{gm}^S = 2$  остварује се задовољавајућа тачност.



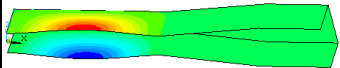
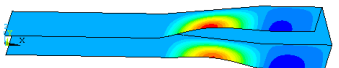
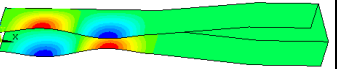
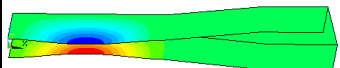
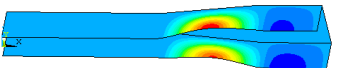
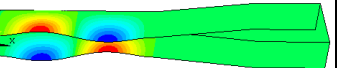
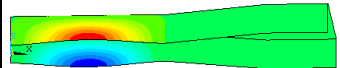
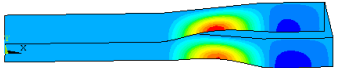
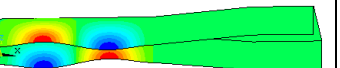

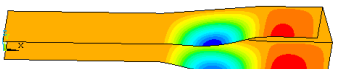
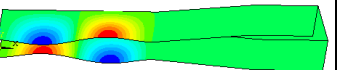
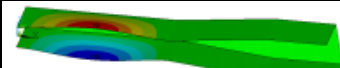
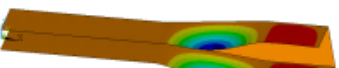
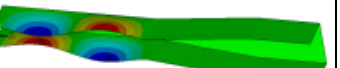
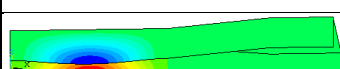
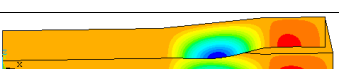
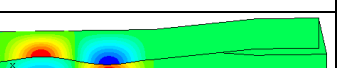
**Слика 5.2.1.4** Зависност својствених вредности  $f_i$  система коначних елемената од параметра нумеричке мреже: а) густине нумеричке мреже  $F_{gm}^S$ , BE=1, ET5 б) типа коришћеног коначног елемента, BE = 1,  $F_{gm}^S = 2$ .

Промена вредности  $f_i$  са повећањем БЕ за мрежу формирану од ET5 са  $F_{gm}^S = 2$  је занемарљива. На слици 5.2.1.4.б су приказане промене вредности  $f_i$  прва три тона са повећањем  $F_{gm}^S$  за моделе формиране од коначних елемената тип ET4 и ET5. Видимо да при  $F_{gm}^S = 2$  изопараметарски коначни елемент љуске са 4 чвора ET4 (т. 4.1.2.4) и билинеарним интерполационим функцијама показује мало лошије карактеристике него изопараметарски коначни елементи љуске са 8 чворова ET2 (т. 4.1.2.2) и ET5 (т. 4.1.2.5), али да остварује наглу конвергенцију ка очекиваном решењу са повећањем  $F_{gm}^S$ . Природне фреквенце модела формираних од



коначних елемента ET2 и ET5 већ при  $F_{gm}^S = 2$  постижу вредности које су блиске вредностима добијеним за нумеричке моделе са већим бројем дискретизационих елемената  $F_{gm}^S = 6$ , што потврђује њихову предност у односу на елемент ET4 за мреже са мањим бројем коначних елемената. Добијени облици симетричних својствених форми вибрација модела коначних елемената канала зависе од тога који тип коначног елемента је коришћен, од броја коначних елемената у средњој површи плоча које чине канал одређен вредношћу  $F_{gm}^S$ , од броја елемената кроз попречни пресек плоче, који је одређен фактором БЕ, али и од коришћеног метода издвајања својствених облика (т.4.1.6), *Subspace* или *Block Lanczos*.

**Табела 5.2.1.3** Својствени облици првих 6 тонова издвојени *Block Lanczos* – овом методом за моделе са три типа коначних елемената, три различите нумеричке мреже формиране са једним елементом по дебљини плоче

Тип ел.	$F_{gm}^S$	Редни број посматраног тона		
		1	4	5
ET2	2			
	6			
ET4	2			
	6			
ET5	2			
	6			

Различити својствени облици издвојени коришћењем методе *Block Lanczos* за моделе са коначним елементом тип ET2, ET4 или ET5, за три различите нумеричке мреже одређене са  $F_{gm}^S = 2, 4$  и 6, са једним елементом по дебљини

плоче БЕ = 1, приказани су у табелама 5.2.1.3. и 5.2.1.4. Различити својствени облици издвојени коришћењем методе *Block Lanczos* за модел формиран од коначних елемената тип ЕТ5, за нумеричку мрежу  $F_{gm}^S = 2$  и бројем елемента по дебљини плоче БЕ = 3, 8 и 16 су приказани у табели 5.2.1.5. Различити својствени облици издвојени коришћењем метода *Subspace* и *Block Lanczos* за моделе са коначним елементом тип ЕТ2, за нумеричку мрежу  $F_{gm}^S = 2,4$  и 6 и бројем елемента по дебљини плоче БЕ = 1 су приказани у табели 5.2.1.6.

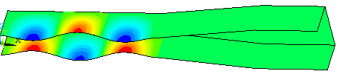
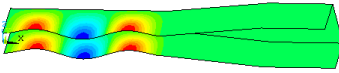
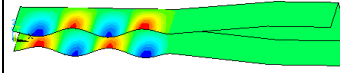
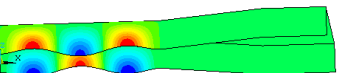
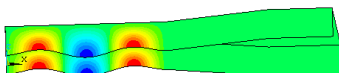
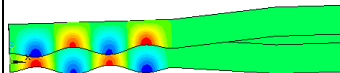
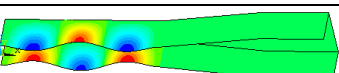
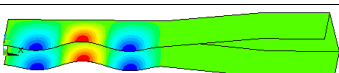
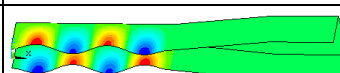
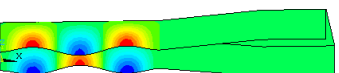
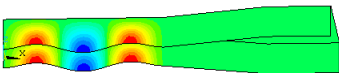
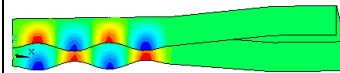
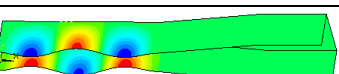
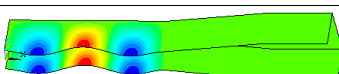
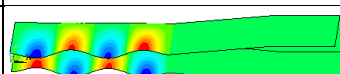
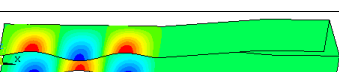
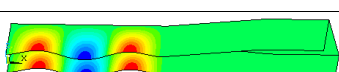
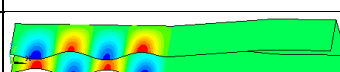
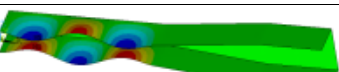
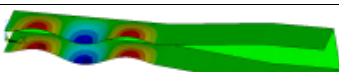
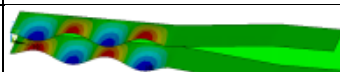
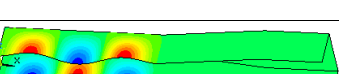
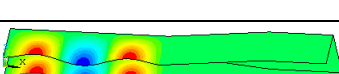
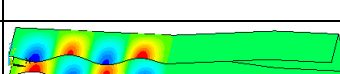
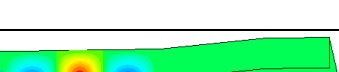
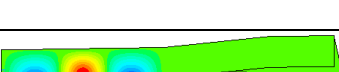
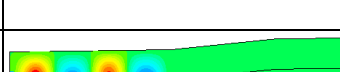
Форме издвојене као несиметричне међу првих двадесет, тонови 7-10, 13,14,17,18 и 20, као и симетричне форме тонова број 2,3 и 16 су идентичне за сваки од нумеричких примера, без обзира на тип коришћеног коначног елемента, коришћену методу издвајања својствених вредности и вектора својствених облика, вредности фактора  $F_{gm}^S$  и БЕ.

У зависности од типа коришћеног коначног елемента издвојени су другачији својствени облици за 4-ти (табела 5.2.1.3.), 11 и 15-ти тон (табела 5.2.1.4.) модела при нумеричкој мрежи исте густине, који изгледају симетрично у односу на  $x$ -у раван (а такође симетрични и у односу на средњу површ посматране плоче, као што је то случај за тонове 11 и 15) али и облици симетрични само у односу на средњу површ посматране плоче (случај 4-тог тона). При дискретизацији структуре канала са једним коначним елементом по дебљини плоче, БЕ = 1, при промени вредности  $F_{gm}^S$  издвајају се другачији својствени облици осциловања (табела 5.2.1.3.) за први (модел са ЕТ2, ЕТ4 и ЕТ5), четврти (ЕТ4) и пети тон (ЕТ4 и ЕТ5). Посматрани облици су симетрични у односу на средњу површ плоче у којој се појављују.

У случају модела формираних од елемената ЕТ2 и ЕТ5 издвајају се облици за тон бр. 5 који се не мењају са променом  $F_{gm}^S$ , али који су међусобно различити. У случају модела са елементом ЕТ4 облик тона бр. 5 се мења са  $F_{gm}^S$  из облика који је издвојен за модел са ЕТ2 у облик који је издвојен за модел са ЕТ4. Облици посматраних тонова за  $F_{gm}^S = 4$  су идентични облицима за  $F_{gm}^S = 2$ , без обзира који коначни елемент је коришћен за дискретизацију. Облици издвојени за тонове 2,3 и 6 су идентични и одговарају облику датом на слици 5.2.1.2, без обзира на

вредност  $F_{gm}^S$  и тип коришћеног коначног елемента. За неке од виших тонова уочено је да издвојени облик зависи од густине мреже и типа коришћеног елемента (табела 5.2.1.4).

**Табела 5.2.1.4** Облици својствених вибрација издвојени Block Lanczos – овом методом за 11, 12, и 15-ти тон за моделе са три типа коначних елемената и три различите нумеричке мреже формиране са једним елементом по дебљини плоче

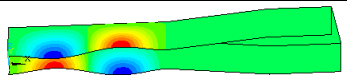
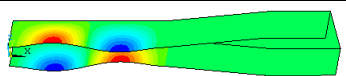
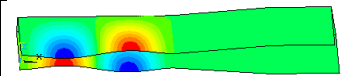
Тип ел.	$F_{gm}^S$	Редни број посматраног тона		
		11	12	15
ET2	2			
	4			
	6			
ET4	2			
	4			
	6			
ET5	2			
	4			
	6			

При густини нумеричке мреже која одговара  $F_{gm}^S = 2$  издвојен је облик 11-тог тона као и при  $F_{gm}^S = 6$ , док је облик при  $F_{gm}^S = 4$  другачији, без обзира који тип

коначног елемента је коришћен за дискретизацију структуре канала. При томе је облик при  $F_{gm}^S = 4$  симетричан у односу на  $x$ -у раван (као и у односу на средњу површ посматране плоче) у односу на облике добијене при  $F_{gm}^S = 2$  и 6. Ако посматрамо облике издвојене за тон бр. 12, облици за моделе формиране од ET2 и ET5 су идентични за  $F_{gm}^S = 2$  и 4, док су другачији за  $F_{gm}^S = 6$  и симетричан је са претходно споменутих у односу на средњу површ посматране плоче. Облици издвојени за 12-ти тон модела формираног од ET4 су идентични за  $F_{gm}^S = 2$  и  $F_{gm}^S = 6$  и такође идентични облицима издвојеним за моделе са ET2 и ET5 за  $F_{gm}^S = 2$  и  $F_{gm}^S = 4$ , док је облик 12-тог тона модела са ET4 за  $F_{gm}^S = 4$  идентичан облицима добијеним у случају модела формираних од коначних елемената ET2 и ET5 са  $F_{gm}^S = 6$ .

Промена облика 15-тог тона је идентична са променом облика 12-тог тона. Својствени облици тонова 7-10, 16, 18 и 20 су идентични за сваки модел без обзира на коришћени тип коначног елемента и вредности  $F_{gm}^S$ . Својствени облици издвојени за првих 20 тонова модела коначних елемената са ET5 за случај термичког оптерећења  $T_{un} \neq 0$ ,  $T_{un} - T_{sp} = 0$  са  $F_{gm}^S = 2$  и бројем елемената по дебљини БЕ = 2, 8 и 16 су идентични са облицима добијеним за тај модел при  $T_{un} = 0$ , али је у случају 5-тог тона модела са  $T_{un} = 300^\circ\text{C}$ ,  $T_{un} - T_{sp} = 200^\circ\text{C}$  и БЕ = 8 издвојен другачији облик него при БЕ = 4 и 16 (табела 5.2.1.5).

**Табела 5.2.1.5** Својствени облик 5-тог тона издвојен за модел формиран од коначних елемената тип ET5 са  $F_{gm}^S = 2$  за различит број елемента по дебљини плоче и при термичком оптерећењу  $T_{un} = 300^\circ\text{C}$ ,  $T_{un} - T_{sp} = 200^\circ\text{C}$

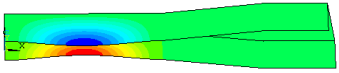
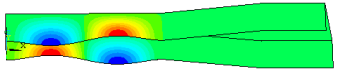
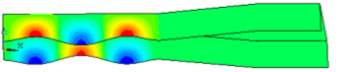

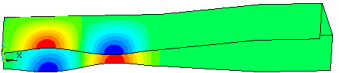
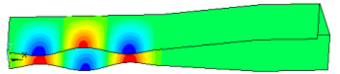
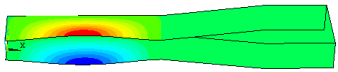
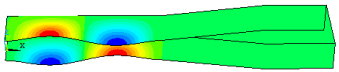
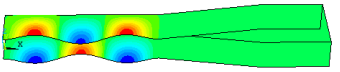
Мод	Број елемента по дебљини плоче БЕ		
	2	8	16
5			

Тоновима са различитим својственим облицима се издвајају и када се уместо *Block Lanczos* примени *Subspace* метода (табела 5.2.1.6). При томе су вредности својствених фреквенција осциловања за моделе коначних елемената са истом нумеричком мрежом добијене коришћењем *Subspace* методе идентичне вредностима добијеним коришћењем *Block Lanczos* методе. За случај када је

структура дискретизована коначним елементом тип ET4 са БЕ =1, за густину нумеричке мреже дефинисане параметром  $F_{gm}^S = 6$  добијамо другачији својствени облик него за нумеричке мреже  $F_{gm}^S = 2$  и  $F_{gm}^S = 4$ , при чему је облик "хоризонталне" плоче секције 1 симетричан у односу средњу површ посматране плоче, али и у односу на  $x$ -у раван. Добијени облици првог тона (табела 5.2.1.6.) су другачији него облици добијени *Block Lanczos* методом (табела 5.2.1.3.), за сваку од посматраних нумеричких мрежа.

Облик издвојен *Subspace* методом за 5-ти тон при  $F_{gm}^S = 2$  је симетричан у односу на  $x$ -у раван и другачији је од облика добијених при  $F_{gm}^S = 4$  и  $F_{gm}^S = 6$ , док је у случају 11-тог тона облик добијен при  $F_{gm}^S = 4$  другачији од облика издвојених за друге густине мреже (табела 5.2.1.6). Слична разлика је примећена и у случају тонова бр. 15 и 19, док су облици осталих издвојених тонова за модел дискретизован коначним елементом ET4 идентични за све разматране густине нумеричке мреже.

**Табела 5.2.1.6** Својствени облици издвојени коришћењем *Subspace* методе за моделе са коначним елементом ET4, БЕ =1, при различитим вредностима  $F_{gm}^S$ .

$F_{gm}^S$	Редни број посматраног тона		
	1	5	11
2			
4			
6			

Издвојени облици природних осцилација око равнотежног положаја структуре дефинисани су векторима померања добијеним решавањем проблема представљеног јед. 3.6.1. За линеарне системе слободне вибрације приказане преко померања чворова модела коначних елемената  $\{u\}$  су хармонијске форме с обзиром на време  $t$  облика

$$\{u\} = \{\phi\}_i \cos(2\pi f_i t) \quad (5.2.1.1)$$

где је  $\{\phi\}_i$  својствени вектор који одговара  $i$  – тој природној фреквенцији  $f_i$ . Стога је облик плоче извијен у спољашњу страну равноправан са обликом извијене плоче ка унутрашњости канала с обзиром да су симетрични у односу на раван  $x$ - $y$  која је истовремено и раван симетрије секције 1 (слика 4.1.1).

Који облик ће се конкретно издвојити, зависи од типа коначног елемента и нумеричке мреже дискретизације, како у средњој површи тако и по дебљини плоча. Без обзира на то, донекле је изненађујућа чињеница да се издвајају различити вектори померања при разичитим параметрима дискретизационе мреже и можда је потребно додатно испитати да ли и на који начин наведени фактори утичу на резултате анализе динамичког понашања структуре која користи методе и алгоритме засноване на комбинацији изабраних тонова.

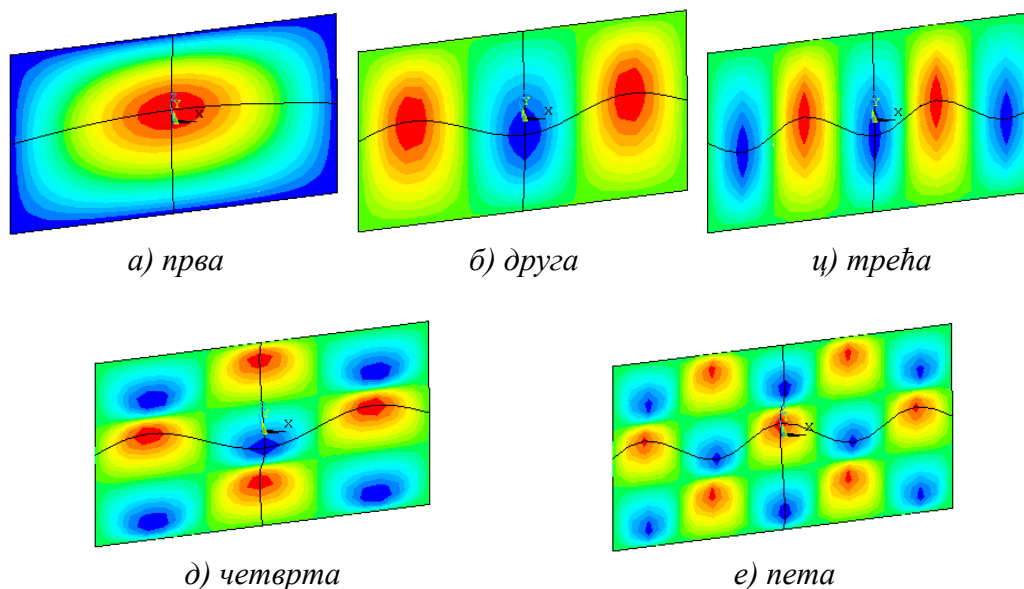
ц) Извршени су прорачуни бифуркационе стабилности структуре и анализирани добијени резултати прорачуна за пример одређивања критичне вредности оптерећења при којем долази до извијања квадратне плоче оптерећене равномерно подељеним оптерећењем по контури у правцу осе  $x$ , са постављеним граничним условима слободног ослањања по свим ивицама.

**Табела 5.2.1.7** Резултати прорачуна критичне вредности оптерећења при којем долази до извијања модела плоче ТЕСТ 2 релативно у односу на аналитичко решење дато у [22] т. 11.6.21, стр. 577.

$F_{gm}^s$	Релативна грешка		
	$(\frac{N_{cr}^{An}}{N_{cr}} - 1) \cdot 100$ [%]		
	Тип коришћеног елемента		
	ЕТ2	ЕТ4	ЕТ5
5	-1,20	1,21	-1,00
10	-0,96	0,07	-0,96
20	-0,96	-0,35	-0,96

Пример је дат у [22], т. 11.6.21, стр. 577. Ова серија прорачуна је означена са ТЕСТ 2. Због симетрије проблема, моделирана је само једна четвртина плоче са

почетком координатног система смештеним у њеном тежишту. Карактеристике плоче: дужина странице  $a = 2\text{m}$ , дебљина  $h = 1 \cdot 10^{-2}\text{m}$ , *Young*-ов модуло  $E = 2,03 \cdot 10^5 \text{MPa}$ , густина  $\rho = 7800 \text{kg/m}^3$  и *Poisson*-ов коефицијент  $\nu = 0,3$ .



Слика 5.2.1.5 Првих 5 бифуркационих форми модела ТЕСТ 2 формираног од коначних елемената тип ЕТ2 за  $F_{gm}^S = 10$

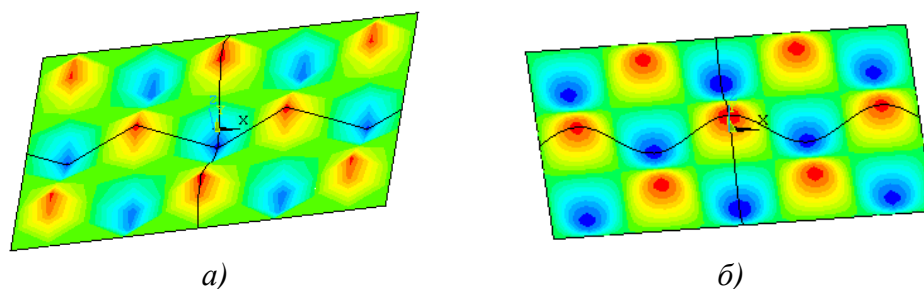
Резултати прорачуна најниже својствене вредности модела плоче формиране од три типа коначних елемената ТЕСТ 2 као критичне вредности оптерећења  $N_{cr}^{An}$  при којем долази до извијања дати су у табели 5.2.1.7. у зависности од густине коришћене нумеричке мреже. Приказани резултати су релативни  $(\frac{N_{cr}^{An}}{N_{cr}} - 1) \cdot 100$

[%] у односу на аналитичко решење  $N_{cr} = 24,8 \frac{D}{(a/2)^2} = 7,341 \cdot 10^5$  [N/m], где је

$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} = 1,859 \cdot 10^4$  [Nm] - крутост плоче на савијање. Нумеричка мрежа је

формирана на основу параметра  $F_{gm}^S$  који представља број квадратних коначних елемената по  $\frac{1}{2}$  странице плоче. Релативно одступање добијених резултата се смањује са повећањем  $F_{gm}^S$  за сваки од коришћених коначних елемената и пада испод 1%, при чему нумерички модели формирано од ЕТ4 показују најбоље карактеристике. За издвајање својствених вектора који одређују равнотежне

форме плоче коришћена је метода *Block Lanczos*-а. Првих 5 равнотежних форми модела ТЕСТ 2 формираног од коначних елемената тип ЕТ2 за  $F_{gm}^S = 10$  приказане су на слици 5.2.1.5.



**Слика 5.2.1.6** Облици 5-те својствене форми издвојени за моделе ТЕСТ 2 са коначним елементима ЕТ2 и ЕТ4: а)  $F_{gm}^S = 5$ , б)  $F_{gm}^S = 10$  и  $F_{gm}^S = 20$

Посматрани су облици својствених форми издвојени у примерима чије су својствене вредности приказане у табели 5.2.1.7. Као и при одређивању својствених форми осциловања и у овом случају су добијени другачији облици при издвајању неких својствених форми модела формираног од истог коначног елемента за различиту вредност  $F_{gm}^S$  (5-та својствена форма за модел формиран од коначних елемената ЕТ2 и ЕТ5 са  $F_{gm}^S = 5$ , дата на слици 5.2.1.6а и модела са  $F_{gm}^S = 10$  и 20, слика 5.2.1.6.б). Издвојене форме су симетричне у односу на средњу површ плоче. Облици осталих форми су идентични без обзира на  $F_{gm}^S$ . Разлике између својствених вредности модела сачињених од коначних елемената тип ЕТ2 и ЕТ5 се смањују са повећањем  $F_{gm}^S$  за сваки од издвојених модова и при  $F_{gm}^S = 20$  постају једнаке за оба типа коначних елемената (табела 5.2.1.8).

У случају модела формираног од коначног елемента ЕТ4, облици треће (слика 5.2.1.7а) и четврте (слика 5.2.1.7б) равнотежне форме модела са  $F_{gm}^S = 5$  су сасвим другачији од облика треће (слика 5.2.1.8а) и четврте (слика 5.2.1.8б) равнотежне форме модела са  $F_{gm}^S = 10$  и  $F_{gm}^S = 20$ , као и одговарајућих форми добијених за моделе са коначним елементима ЕТ2 и ЕТ4 (слика 5.2.1.6). Облици издвојене форме број 3 (слика 5.2.1.8а) и форме број 4 (слика 5.2.1.8б) модела са коначним елементом тип ЕТ4 и нумеричком мрежом  $F_{gm}^S = 5$  су симетричне у односу на средњу површ плоче. Својствене вредности ових форми су приближних

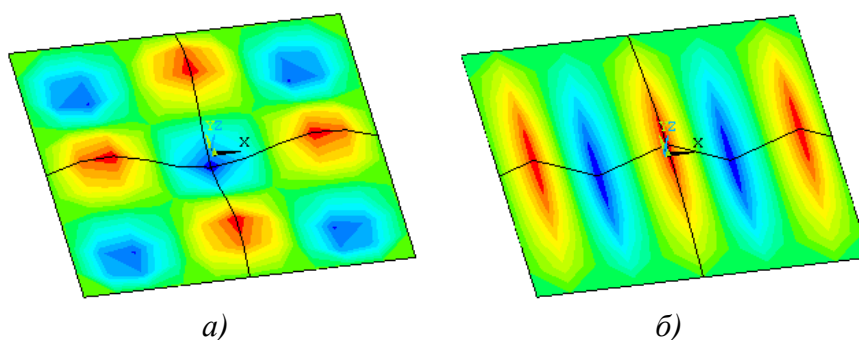


вредности, али се разликују од одговарајућих својствених вредности добијених за трећу и четврту форму модела са  $F_{gm}^S = 10$  и  $F_{gm}^S = 20$  (табела 5.2.1.9). Својствене вредности форми број 3 и 4 модела формираних од ЕТ4 се такође разликују и од својствених вредности треће и четврте форме модела формираних од коначних елемената тип ЕТ2 и ЕТ4 (табела 5.2.1.8).

**Табела 5.2.1.8** Првих пет својствених вредности модела са коначним елементима тип ЕТ2 и ЕТ5 при различитим густинама нумеричке мреже  $F_{gm}^S$ , дато у [N/m].

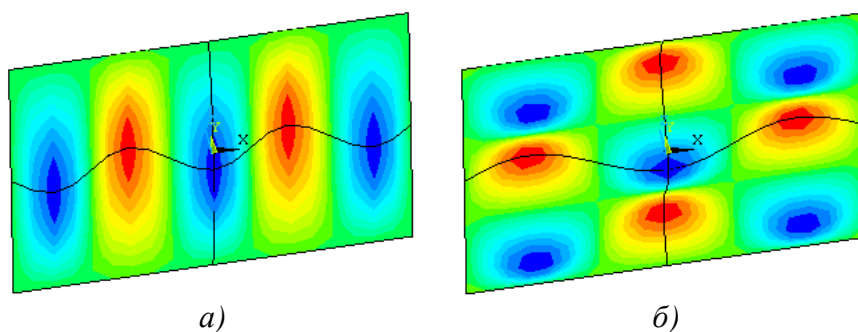
МОД	Својствене вредности ТЕСТ 2 [N/m]					
	ЕТ2			ЕТ5		
	$F_{gm}^S$					
	5	10	20	5	10	20
1	0,7253E+06	0,7270E+06	0,7270E+06	0,7268E+06	0,7270E+06	0,7270E+06
2	0,2026E+07	0,2027E+07	0,2026E+07	0,2030E+07	0,2027E+07	0,2026E+07
3	0,4968E+07	0,4923E+07	0,4919E+07	0,4988E+07	0,4923E+07	0,4919E+07
4	0,6522E+07	0,6514E+07	0,6513E+07	0,6563E+07	0,6514E+07	0,6513E+07
5	0,8504E+07	0,8351E+07	0,8346E+07	0,8623E+07	0,8351E+07	0,8346E+07

д) Извршена је серија прорачуна означена са ТЕСТ 3 са циљем да се одреде критичне вредности оптерећења при којем долази до извијања квадратне плоче оптерећене равномерно подељеним оптерећењем по контури у правцу осе  $x$ , са постављеним граничним условима укљештења по свим ивицама. Пример је дат у [22], т. 11.6.21, стр. 577 и по геометријским и карактеристикама материјала је идентичан примеру ТЕСТ 2.



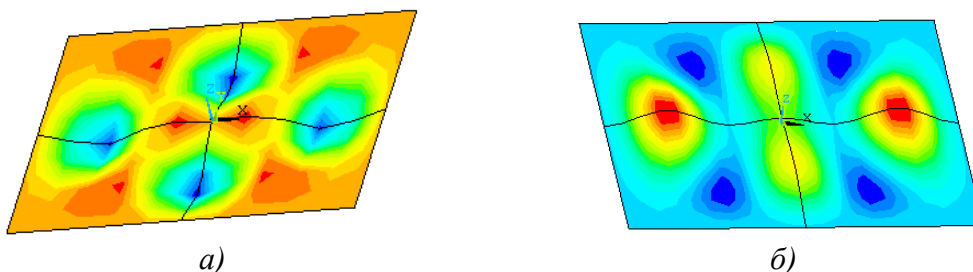
**Слика 5.2.1.7** Облици својствених форми издвојени за модел ТЕСТ 2 са коначним елементом тип ЕТ4,  $F_{gm}^S = 5$ : а) трећи мод, б) четврти мод,

Анализирани су резултати добијени коришћењем шест модела коначних елемената тип ET5 са нумеричким мрежама дефинисаним са  $F_{gm}^S = 5$  и  $F_{gm}^S = 10$  и бројем коначних елемената по дебљини плоче одређеним са БЕ = 1, БЕ = 4 и БЕ = 16. Слично претходном примеру, издвојени су другачији облици 4-те форме за моделе са различитим нумеричким мрежама (слика 5.2.1.9), које су симетричне у односу на средњу површ плоче. Добијене својствене форме и својствене вредности модела са различитим бројем коначних елемената по дебљини плоче су идентичне за моделе са истим  $F_{gm}^S$ . Облик издвојеног мода зависи од типа коришћеног коначног елемента (слике 5.2.1.5е и 5.2.1.6а) и густине мреже коначних елемената у равни средње површи (слике 5.2.1.5, 5.2.1.7 и 5.2.1.8).



**Слика 5.2.1.8** Облици својствених форми издвојени за модел ТЕСТ 2 са коначним елементом тип ET4,  $F_{gm}^S = 20$ : а) трећи мод, б) четврти мод

Покушај успостављања зависности облика издвојеног мода и наведених нумеричких карактеристика је у овој фази рада на тези остао без успеха. Потребан је додатни рад на анализи ових проблема.



**Слика 5.2.1.9** Облици 4-те форме примера ТЕСТ 3 за различите нумеричке мреже формиране са ET5: а)  $F_{gm}^S = 5$ , б)  $F_{gm}^S = 10$

е) Резултати бифуркационе анализе термички оптерећеног модела структуре канала дискретизованог мрежом коначних елемената типа ET2 са  $F_{gm}^S = 2$ ,  $BE = 1$  и граничним условом ослањања описаним у т.4.11 приказани су на сликама 5.2.1.10. и 5.2.1.11. У теорији линеарне (бифуркационе) стабилности се претпоставља да је распоред напона у структури независтан од интензитета оптерећења, односно да је квалитативно увек исти, па се сматра да су напони у систему коначних елемената којима је дискретизована посматрана структура пропорционални оптерећењу [22, 23]. Под тим претпоставкама се као својствена вредност решења проблема (3.3.1) добија фактор пропорционалности критичног и актуелног спољашњег оптерећења.

**Табела 5.2.1.9** Својствене вредности плоче дискретизоване коначним елементом тип ET4 при различитим густинама нумеричке мреже  $F_{gm}^S$  [-] и при  $BE = 1$ .

форма	својствене вредности модела ТЕСТ 3 [-]		
	$F_{gm}^S$		
	5	10	20
1	0.74298E+06	0.73462E+06	0.73151E+06
2	0.23178E+07	0.20961E+07	0.20460E+07
3	0.74715E+07	0.54362E+07	0.50421E+07
4	0.77429E+07	0.67670E+07	0.65992E+07
5	0.11695E+08	0.90031E+07	0.85239E+07

Напони индуковани термичким оптерећењем плоча зависе од раванских деформација у средњој површи плоче али и од деформација услед савијања на ивицама плоча, које деформације су пропорционалне термичком оптерећењу. Стога фактор пропорционалности актуелног и критичног оптерећења у нашем случају термички оптерећене танкозидне структуре не може се директно одредити као у случају структуре подвргнуте само механичком оптерећењу. Примењен је следећи итеративни поступак у циљу одређивања критичне вредности температуре  $T_{kr}$  при којој долази до појаве губитка стабилности структуре. Модел формиран од елемента ET2 је оптерећен јединичним оптерећењем (температуром од  $T_{un} - T_{ref} = 1^\circ\text{C}$ , где је  $T_{ref} = 273\text{K}$  температура на којој је претпостављено да у структури канала не постоје термички индуковани напони).

Као резултат бифуркационе анализе (линеарне) стабилности термички оптерећене структуре канала добија се фактор  $B_1$  који је у општем случају  $B_1 \neq 1$ . Затим је спроведен други прорачун са термичким оптерећењем  $T_{un}^1 = B_1 \cdot T_{un}$ , где се као резултат добија фактор  $B_2$ . У случају да је  $B_2 \approx 1$  у траженим границама тачности одређивања  $T_{kr}$ , сматрамо да је одређена вредност  $T_{kr}$ .

**Табела 5.2.1.10** Критичне вредности термичког оптерећења  $T_{kr}$  при којем долази до губитка стабилности структуре канала

Почетна вредност $T_{un}$ [°C] / $(T_{un} - T_{sp})$ [°C]	1 / 0	1 / 0,25	1 / 0,50	1 / 0,75	1 / 1
Ред. бр. прорачуна	Вредност фактора $B$ [-]				
1	19,4280	22,2030	25,9040	31,0840	38,8560
2	1,00008	1,00001	0,99999	1,00012	1,0003
Усвојено за критичну вредност $T_{un}$ [°C] / $(T_{un} - T_{sp})$ [°C]	19,4296 / 0	22,2032 / 5,55081	25,9037 / 12,9518	31,0875 / 23,3156	38,8676 / 38,8676

У супротном, на објашњени начин се спроводи трећи, четврти итд. прорачун све док добијена вредност  $T_{kr}$  не буде одређена са захтеваном тачношћу. Овај алгоритам се разликује од алгоритма датог у примеру т.5.7 реф. [24] по избору вредности почетног термичког оптерећења, јер се уместо вредности блиској очекиваној  $T_{kr}$  у првом прорачуну полази од  $T_{un} - T_{ref} = 1^\circ\text{C}$ . Резултати одређивања критичне вредности температуре  $T_{kr}$  при којој долази до губитка стабилности структуре канала за различита термичка оптерећења  $T_{un} / (T_{un} - T_{sp})$  према линеарној теорији стабилности дати су у табели 5.2.1.10. Видимо да се довољно тачне вредности  $T_{kr}$  добијају већ после другог узастопног прорачуна, док је у примеру датом у примеру т.5.7 референце [24] за одређивање  $T_{kr}$  било потребно спровести 7 узастопних прорачуна.

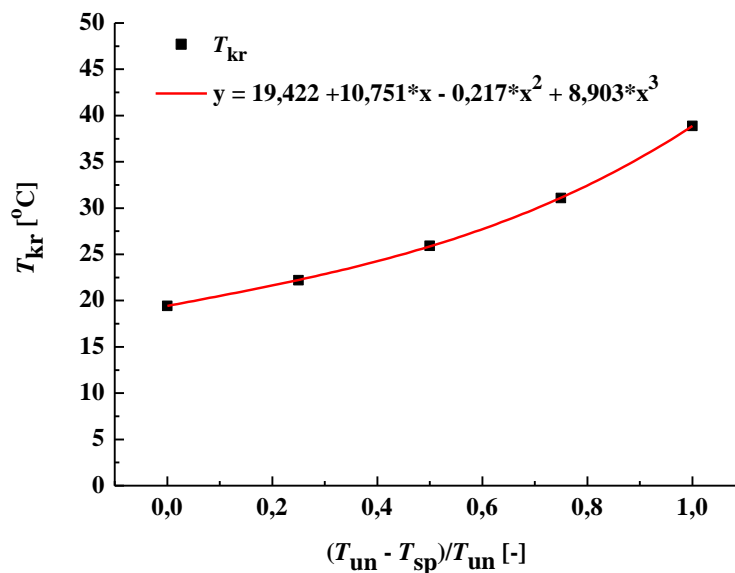
На основу резултата датих у табели 5.2.1.10. видимо да својствене вредности модела коначних елемената структуре канала расту са повећањем  $(T_{un} - T_{sp})$ . Промена критичних вредности температуре  $T_{kr}$  са релативном променом  $(T_{un} - T_{sp})/T_{un}$  приказана је на слици 5.2.1.10. Једначина криве је:

$$y = 19,422 + 10,751 \cdot x - 0,217x^2 + 8,903 \cdot x^3 \quad (5.2.1.2)$$

где је  $x = (T_{un} - T_{sp})/T_{un}$  [-],  $y = T_{kr}$ . За оцену квалитета избора функције (5.2.1.2) којом је представљен (фитован) посматрани сет података у овом раду је коришћен параметар подешена сума квадрата резидуала (*Adjusted residual sum of squares*):

$$\overline{R^2} = 1 - \frac{RSS / df_{Error}}{TSS / df_{Total}} \quad (5.2.1.3)$$

где је резидуал суме квадрата  $RSS(X, \hat{\Theta}) = \sum_{i=1}^n [Y_i - f(x_i, \hat{\Theta})]^2$ ,  $Y_i$  су вредности функције  $Y = f(X, \Theta) + \varepsilon$  којом фитујемо сет података за независно промењиве  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  тако да изабрани параметри  $\Theta = (\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_n)$  доводе до минимума одступања изабране функције од експерименталних података са усвојеном грешком  $\varepsilon$ , укупна сума квадрата је  $TSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ , а  $df$  - број степени слободе посматраног сета података. У овом случају је добијена вредност од  $R^2 = 0,99993$ .



Слика 5.2.1.10 Промена критичних вредности температуре  $T_{kr}$  са релативном променом  $(T_{un} - T_{sp})/T_{un}$

Коришћењем једначине (5.2.1.2), можемо одредити са приближном тачношћу вредности  $T_{kr}$  и  $(T_{un} - T_{sp})_{kr}$  за остале случајеве термичког оптерећења структуре канала дефинисане односом  $(T_{un} - T_{sp})/T_{un}$ . Применом једначине (5.2.1.2) за произвољни случај  $T_{un} = 472^{\circ}\text{C}$  и  $(T_{un} - T_{sp}) = 165^{\circ}\text{C}$ , са  $(T_{un} - T_{sp})/T_{un} = 0,3496$  добијамо  $T_{kr} = 23,534^{\circ}\text{C}$ ,  $(T_{un} - T_{sp})_{kr} = 8,228^{\circ}\text{C}$ . Резултати провере за споменути случај дати су у табели 5.2.1.11. Нумеричком бифуркационом анализом методом коначних елемената након 5 узастопних прорачуна добијене је вредност за критичну температуру  $T_{kr} = 23,543^{\circ}\text{C}$ , што је за 0,04% веће од вредности добијене применом једначине (5.2.1.2).

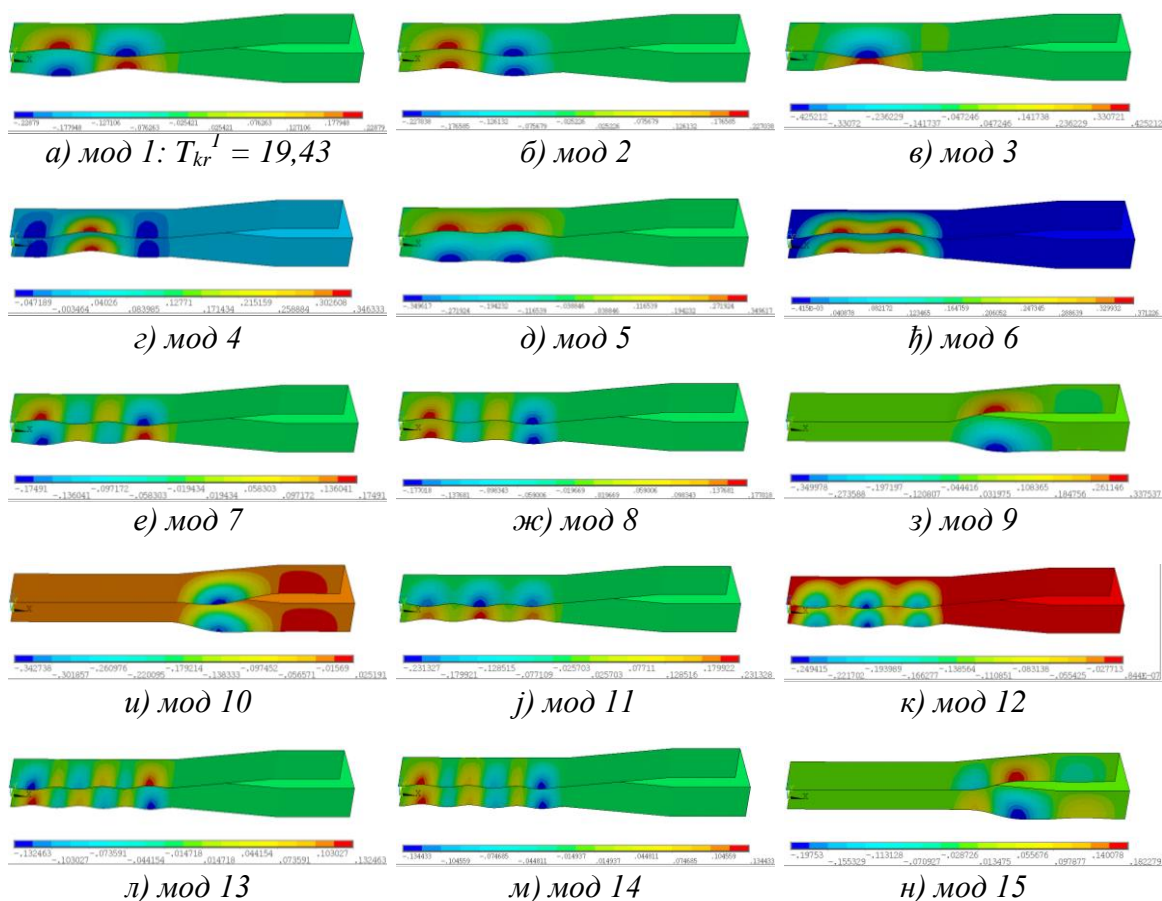
**Табела 5.2.1.11** Резултати итеративног поступка прорачуна критичних вредности термичког оптерећења за случај  $T_{un} = 472^{\circ}\text{C}$  и  $(T_{un} - T_{sp}) = 165^{\circ}\text{C}$

<b>Почетна вредност</b> $T_{un} [^{\circ}\text{C}] / (T_{un} - T_{sp}) [^{\circ}\text{C}]$	<b>472<sup>o</sup>C / 165<sup>o</sup>C</b>
Ред. бр. прорачуна	Вредност фактора В [-]
1	0,106102
2	0,481553
3	0,976286
4	0,999933
<b>Усвојено за критичну</b> <b>вредност</b> $T_{un} [^{\circ}\text{C}] / (T_{un} - T_{sp}) [^{\circ}\text{C}]$	<b>23,543 / 8,230</b>

Због претпоставки теорије линеарне (бифуркационе) стабилности датим у т.3.2, горња једнакост није примењива за вредности термичког оптерећења при којем долази до појаве пластичних деформација у материјалу структуре. Према резултатима добијеним у т.2.2.1 и т. 2.2.2. то је вредност температуре која се налази између  $42,2^{\circ}\text{C}$  и  $59,6^{\circ}\text{C}$ .

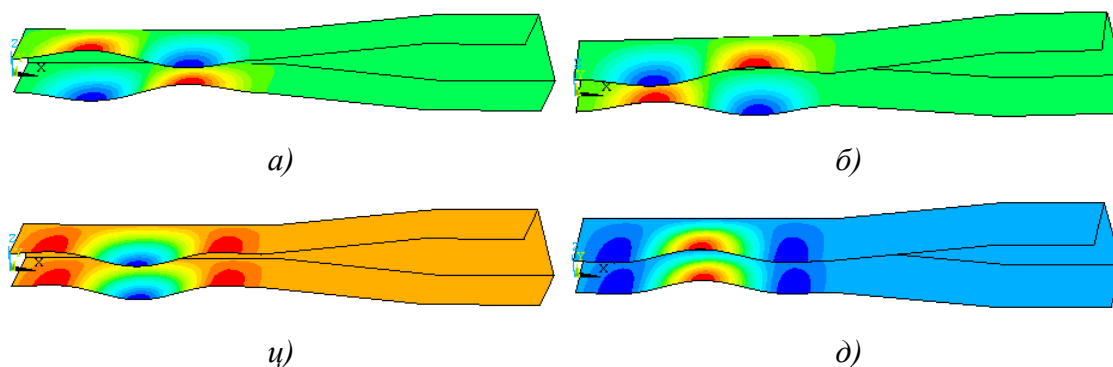
Облик (2,1) прве равнотежне форме (мода) "хоризонталних" плоча секције 1 добијен методом коначних елемената термички оптерећеног модела канала формираног коришћењем коначног елемента ЕТ2 (слика 5.2.1.11) је у сагласности са аналитичким решењем јед. 2.2.4, при чему су прве својствене вредности добијене нумерички за модел коначних елемената веће од вредности  $T_{kr}$  добијених аналитички само за плочу ( $19,43^{\circ}\text{C}$  у односу на  $14,3^{\circ}\text{C}$ ) као последица различитих

услова ослањања посматраних плоча у ова два случаја. Као и у претходним случајевима, облик издвојеног мода не зависи само од типа коришћеног коначног елемента и густине мреже коначних елемената у равни средње површи плоче, већ и од броја елемената по дебљини зида канала (слика 5.2.1.14). При промени броја елемената по дебљини плоче издвајају се за први мод облици као симетрични у односу на средњу површ плоче, при чему су облици "хоризонталних" плоча секције 1 симетрични односу на  $x$ -у раван (слике 5.2.1.12а и 5.2.1.12б). Идентична ситуација је и у случају модова број 5, 11 и 17. При промени броја елемената по дебљини плоче, облици издвојени за четврти мод су симетрични у односу на средњу површ плоче, али облици "хоризонталних" плоча секције 1 нису симетрични односу на  $x$ -у раван (слике 5.2.1.12ц и 5.2.1.12д). Оваква ситуација се понавља и у случају облика издвојених за модове бр. 6 и 18.



Слика 5.2.1.11 Померања  $w$  у правцу осе  $z$  чворова нумеричке мреже модела за првих 15 својствених форми (модова) термички оптерећеног канала

Извршена је серија линеарних (бифуркационих) прорачуна означена са ТЕСТ 4 за модел канала формиран од коначног елемента тип ЕТ2 и параметрима мреже  $F_{gm}^S = 2$ , БЕ = 1, са почетним термичким оптерећењима  $T_{un}^I = T_{kr} - 1^\circ\text{C} = 18,4296^\circ\text{C}$  и  $T_{un}^{II} = T_{kr} + 1^\circ\text{C} = 20,4296^\circ\text{C}$ , где је  $T_k = 19,4296^\circ\text{C}$  критична вредност температуре при којој долази до губитка стабилности модела канала при  $(T_{un} - T_{sp}) = 0^\circ\text{C}$ . Алгоритам одређивања вредности  $T_k$  је идентичан горе предложеном и резултати серије прорачуна ТЕСТ 4 су шематски приказани на слици 5.2.1.13.

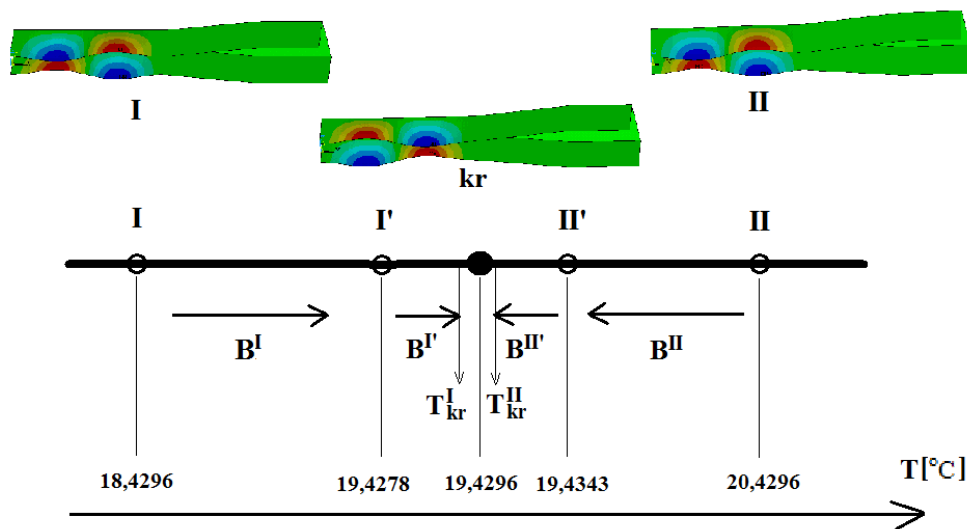


**Слика 5.2.1.12** Својствени облици издвојени линеарном анализом за моделе формиране од коначног елемента тип ЕТ5 са  $F_{gm}^S = 2$ : а) први мод, БЕ = 3, б) први мод, БЕ = 8, ц) четврти мод, БЕ = 3, д) четврти мод, БЕ = 16

При прорачуну у којем се пошло од вредности  $T_{un}^I = 18,4296^\circ\text{C} < T_{kr}$ , издвојен је облик за први мод означен са **I** на слици 5.2.1.13. при чему је добијен фактор пропорционалности  $V^I = 1,05416$ . Фактором  $V^I$  је одређена вредност  $T_{un}^{I'} = V^I \cdot T_{un}^I = 1,05416 \cdot 18,4296^\circ\text{C} = 19,4278^\circ\text{C}$  термичког оптерећења у следећем прорачуну, означеног са **I'** на слици 5.2.1.13. Као резултат прорачуна **I'** добијен је облик прве својствене форме означен са **kr** на слици 5.2.1.13. са фактором пропорционалности  $V^{I'} = 1,00009$  којим је одређена приближна вредност  $T_{kr}^{I'} = V^{I'} \cdot T_{un}^{I'} = 19,4295^\circ\text{C}$ . Овде треба напоменути да смо у поступку одређивања  $T_{kr}$  модела канала могли да се зауставимо и након завршеног прорачуна **I** правећи грешку у одређивању приближне вредности  $T_{kr}$  од  $100 \cdot (1 - 19,4278 / 19,4296)$ , дакле  $< 0,01\%$ , али би у том случају за "хоризонталне" плоче секције 1 добили облике при првој бифуркационој форми који су симетрични у односу на средњу површ плоча као и у односу на  $x$ -у раван, гледано у односу на облике добијене након прорачуна **I'**.



При прорачуну у којем се пошло од вредности  $T_{un}^{II} = 20,4296^{\circ}C > T_{kr}$ , издвојен је облик за први мод означен са **II** на слици 5.2.1.13. при чему је добијен фактор пропорционалности  $B^{II} = 0,95128$ . Фактором  $B^{II}$  је одређена вредност  $T_{un}^{II'} = 0,95128 \cdot 20,4296^{\circ}C = 19,4343^{\circ}C$  термичког оптерећења у следећем прорачуну, означеног са **II'** на слици 5.2.1.13. Као резултат прорачуна **II'** добијен је облик прве својствене форме означен са **kr** на слици 5.2.1.13, са фактором пропорционалности  $B^{II'} = 0,99976$  којим је одређена приближна вредност  $T_{kr}^{II'} = B^{II'} \cdot T_{un}^{II'} = 19,4295^{\circ}C$ . Као и у претходном случају, да смо се у поступку одређивања  $T_{kr}$  зауставили након завршеног прорачуна **II** грешка у одређивању приближне вредности  $T_{kr}$  би била  $100 \cdot (19,4343/19,4296 - 1)$ , која је  $\approx 0,02\%$ , али би за "хоризонталне" плоче секције 1 добили облике идентичне облицима добијеним прорачуном **I**.



*Слика 5.2.1.13* Облици при првој својственој вредности добијене итеративним поступком ТЕСТ 4 одређивања  $T_{kr}$ -модела канала формираног од коначног елемента ET2 са  $F_{gm}^S = 2$ ,  $BE = 1$ , полазећи од  $T_{un}^I = 18,4296^{\circ}C$  и  $T_{un}^{II} = 20,4296^{\circ}C$

Издвојени својствени облици структуре приказани у претходним примерима, било да се ради о својственим облицима осциловања или извијања, су одређени померањима која чине вектор померања чворова нумеричке мреже. Вектор померања се добија решавањем стандардног проблема одређивања својствених вредности (јед. 3.6.1). У случају симетрије око равни x-y облик плоче извијен у

спољашњу страну је равноправан са обликом извијене плоче ка унутрашњости канала јер вектори померања који одговарају тим облицима идентички задовољавају јед. 3.6.1. У случају издвојених облика "хоризонталних" плоча секције 1 који имају карактеристику симетрије у односу на средњу раван плоче али не и у односу на равни  $x$ -у добијамо ситуацију која сугерише да у том случају важи исти закључак. Који облик мода ће се конкретно издвојити зависи од типа коришћеног коначног елемента и структуре нумеричке мреже којима је извршена дискретизација структуралног нумеричког домена. Досадашњим радом се није успела успоставити одговарајућа зависност и тај проблем остаје као тема за даље истраживање.

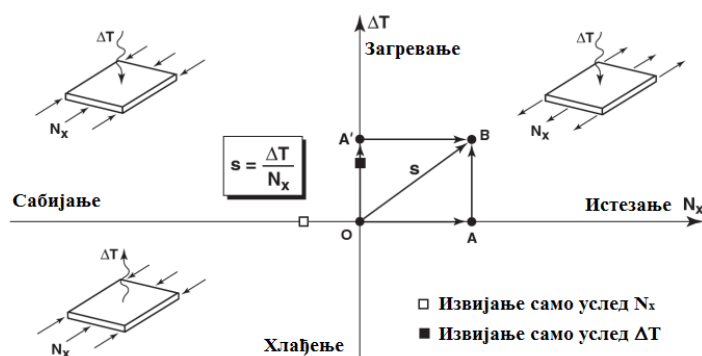
Основне претпоставке МКЕ, као и осталих дискретизационих нумеричких метода су да: а) повећање броја дискретизационих елемената обезбеђује конвергенцију резултата прорачуна, б) апроксимација непознатих величина у домену дискретизационог елемента зависи од облика дискретизационог елемента и промене геометријских величина којима је дефинисан (дужине страница и углови између њих). Ако се нумеричким прорачуном заснованом на неком од метода дискретизације добију резултати који нису у сагласности са наведеним претпоставкама, највероватније су нарушене или непримењиве неке битне претпоставке на основу којих је нумерички модел формиран, као што су квалитет и избор дискретизационе мреже и коначног елемента, модел граничних и почетних услова, оправданост и квалитет избора типа прорачуна итд. Овакви примери неконзистентности добијених у односу на очекиване резултате прорачуна применом МКЕ нису пронађени у до сада прегледаној литератури сем случаја којим су се бавили *Sadowski* и *Rotter* [102], где су коришћењем софтверског пакета ABAQUS анализирана четири типска проблема стабилности љуски и плоча за које проблеме је познато аналитичко решење. Резултати нумеричке анализе наведених примера указују на одређену меру утицаја густине и угла који мрежа правоугаоних коначних елемената заклапа са правцем дејства главних напона на добијени резултат. Аутори нису дали конкретан одговор на питање шта је узрок наведене појаве али су изашли са претпоставком да је у

наведеним случајевима један од могућих узрока орјентација коначног елемента у односу на главне правце напона остварених у структури.

Постоји више примера где је битно која од симетричних форми издвојеног својственог облика је предмет разматрања и који својствени вектор се користи у поступку решавања неког конкретног проблема. У анализи динамичког понашања структуре примењују се разне методе и алгоритми који користе комбинације изабраних својствених облика вибрација за одређивање динамичких карактеристика структуре, као што су методе које користе спектралну анализу и комбинацију модова, карактеризација динамичког одговора структуре на динамичку или квазихармонијску побуду коришћењем метода суперпозиције модова, анализа природних вибрација структуре подвргнуте случајним вибрационим оптерећењем итд. Ови и многи други алгоритми су уграђени и у великој мери аутоматизовани у програмски пакет ANSYS. У случају решавања проблема стабилности структуре, као један од примера који зависи од облика добијеног мода навешћемо пример избора тачке у којој ће се извршити укљештење танкозиде равне структуре, са циљем повећања вредности критичног оптерећења при којој долази до губитка стабилности и контролисања облика у који се при томе структура извија што еј био предмет рада *Paik* и др. [98]. Други пример је коришћење технике комбиновања изабраних модова добијених бифуркационом анализом као најприближнију претпоставку о стварном облику у који се извија структура која губи стабилност, како су то у својим радовима користили *Aly* [99] и још детаљније *Arbocz* [100-101]. Померања чворова (тачака структуре) сваког мода се множе одговарајућим фактором (или се померања представљају функцијама изабраним на основу облика мода) са циљем да се формира облик (или функција) која ће се узети као почетна геометријска несавршеност структуре. Уколико је геометријска несавршеност унапред утврђена мерењем или је несавршеност позната карактеристика производног процеса структуралног елемента, може се изабрати сет познатих апроксимативних функција којима би се геометријска несавршеност представила. У анализи стабилности структуре од интереса је да се одреди, из серије функција којима се

почетна геометријска несавршеност може апроксимирати, таква функција која доводи до најнижих вредности критичног оптерећења [99-101].

У нашем случају анализе међусобног утицаја термички оптерећење структуре канала и струје аеросмеше која протиче кроз канал је такође битно да ли се плоча извија ка унутрашњости или ка спољашности канала. С обзиром да се ради о формама симетричним у односу на средњу површ плоче, а у неким случајевима и у односу на раван  $x$ - $y$ , промена пресека струјног простора канала у оба случаја ће бити идентична, али ће положај најужег пресека деформисаног канала и само струјно поље које се при томе формира бити другачији.



**Слика 5.2.1.14** Извијање правоугаоне плоче у зависности од примене пропорционалног или непропорционалног узастопног уноса оптерећења

Ако посматрамо правоугаону плочу оптерећену силом по јединичној дужини  $N_x$  у равни средње површи и униформно загрејану до температуре  $\Delta T = T - T_0$  где је  $T_0$  референтна температура при којој сматрамо да не постоје термички индуковани напони, ова два различита оптерећења можемо применити на плочу истовремено у константном односу једног према другом (пропорционално оптерећивање) или прво једно па друго, при чему је редослед примене оптерећења битан. Плочу можемо оптеретити статичким аксијалним и термичким оптерећењем пропорционално са сталним односом  $s = \Delta T / N_x$  сходно путањи  $OB$ , али и секвенцијално прво силом  $N_x$  у пуном износу а затим температурним оптерећењем, при чему ће плоча без појаве извијања доћи у стање  $B$  (слика 5.2.1.14). Обратно, нисмо у могућности да пратимо путању од  $O$  до  $A'$  јер ће доћи до извијања плоче услед повећања температуре без примене аксијалног

оптерећења и неће бити могуће да се постигне тачка А'. У даљем делу ће бити анализиран утицај појединих оптерећења као и начин и редослед уноса оптерећења на деформисање структуре канала и перформансе нумеричког прорачуна.

У прорачунима су коришћене дискретизационе мреже са  $F_{gm}^S = 2$ ,  $BE = 1$ , формиране од коначних елемената ET2, а случајеви који одступају од овога биће посебно наглашени.

### *5.2.2 Претходни прорачуни термички оптерећених канала РГ и ЦГ*

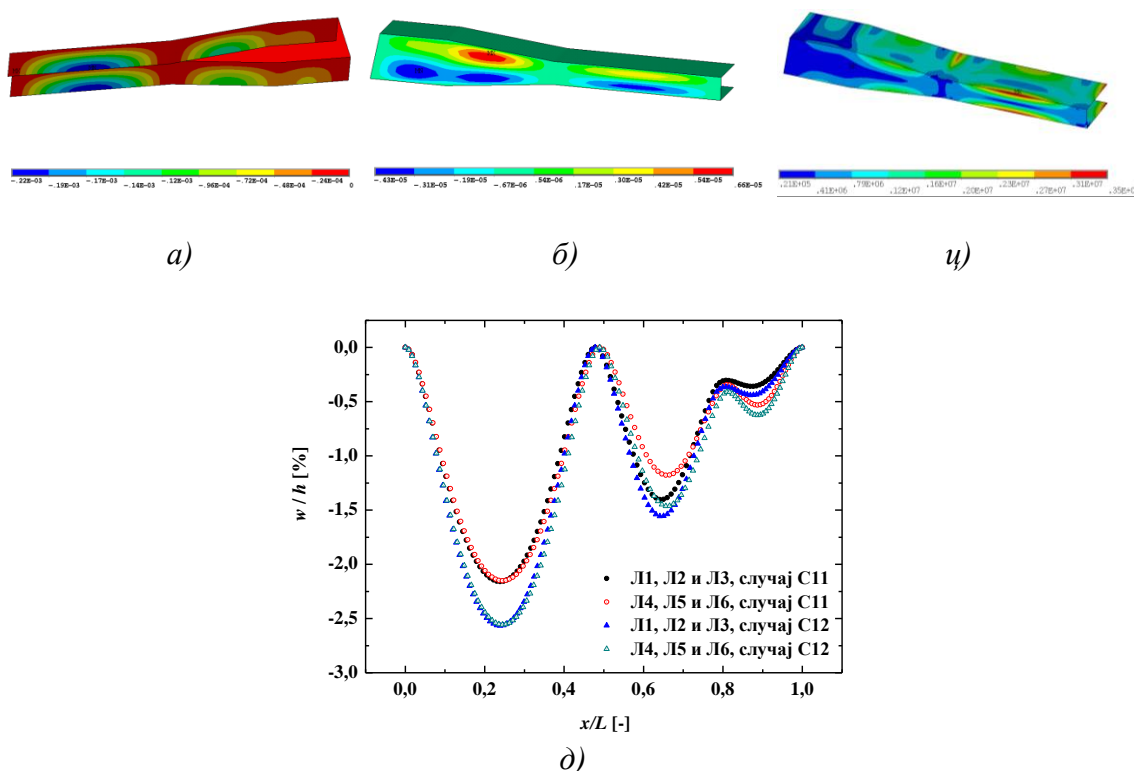
На самом почетку рада на пројекту развоја система за плазма припрему, спроведена је студија [3] у оквиру које је извршена серија статичких структуралних термонапонских симулација за два различита термички оптерећена модела који репрезентују могућа конструктивна решења реконструкције канала аеросмеше горионичког пакета. У овом поглављу неће бити приказани резултати остварени у оквиру студије, већ ће укратко бити изнети основни закључци. У постојећој конструкцији правоугаоног попречног пресека, проблеми термичких дилатација и напрезања су веома изражени без обзира на умерену температурску разлику радних флуида који протичу кроз њих у случају без примене плазме. Циљ ове анализе је био да се изнађе повољније конструктивно решење канала аеросмеше између четири предложена решења базирана на геометријским концепцијама РГ и ЦГ. У ту сврху су извршени нумерички прорачуни коришћењем МКЕ и софтверског пакета ANSYS. Прво је извршена верификациона анализа квалитета усвојених коначних елемената и параметара математичког модела коришћеног у прорачуну. Затим су спроведени нумерички прорачуни под претпоставкама линеарне (уз коришћење елемената ET1 и ET3) и нелинеарна теорије (применом ET2 и ET4). Потврдило се да је проблем изразито нелинеаран, како са аспекта промене карактеристика материјала са температуром, тако и оствареног напонско-деформационог стања у структури. За даљи прорачун су изабрани коначни елементи тип ET2 и ET4 и усвојене дискретизационе мреже, а

затим и серија нумеричких прорачуна за различите услове термичког оптерећења и услове ослањања модела канала. Добијени резултати су истакли предности концепције ЦГ са котрљајућим ослонцима (*Pavlović* и др. [4], *Stefanovic* и др. [5]) у погледу најнижих вредности и најприхватљивије расподеле  $\sigma_{VM}$  у структури канала, као и оствареног облика деформисања. На основу донетих закључака, у наредном периоду је извршена реконструкција канала аеросмеше два горионичка пакета М12 и М15 на блоку А1 термоелектране ТЕНТ А тако што су постојећи канали РГ концепције замењени са одговарајућим каналима ЦГ [1].

### 5.2.3 Утицај гравитационог оптерећења на деформисање структуре

Резултати нумеричке симулације модела коначних елемената тип ЕТ2 канала са  $F_{gm}^S = 2$  и ММ1 подвргнутог само дејству гравитационог оптерећења као запреминског (означено као случај С1а) приказани су на сликама 5.2.3.1 а-ц. Померања чворова у равни симетрије канала на који делује гравитационо оптерећење унето као инерционо са убрзањем  $\vec{g} = -9,81\vec{k}$ , где је  $\vec{k}$  јединични вектор правца  $z$ -осе (случај С1а) и као расподељено у средњој површи плоче са интензитетом  $\rho gh \cdot dA = 765Pa$ , где је  $\rho$  густина,  $h$  дебљина а  $dA$  површина елемента плоче и  $g = 9,81 [m/s^2]$  гравитациона константа (означен као случај С1б) приказани су на слици 5.2.3.1 д). Прорачуном С1а је као највеће померање центара "хоризонталних" плоча секције 1 добијено 0,22mm, што је ~2% дебљине плоче  $h$ , при чему плоче формирају облик који личи на полуталасни и испупчене су у правцу дејства гравитације (сл. 5.2.3.1а). Ово померање је релативно велико, али се односи на релативно малу зону смештену у средишту "хоризонталних" плоча секције 1 (сл. 5.2.3.1д). Међутим, скоро четвртина чворова ове плоче остварује померања већа од 1%  $h$ . Чворови горње "хоризонталне" плоче секције 2 су остварили приметно веће вредности померања од чворова доње плоче, која заклапа угао са вертикалом за  $16^\circ$  мањи од угла који са вертикалом заклапа горња плоча. Бочне плоче секција 1, 2 и 3 заузимају облик са једним полуталасом у  $x$ -правцу и два полуталаса у  $z$ -правцу (сл. 5.2.3.1б), уместо облика са једним

полуталасом у оба правца како је добијено у [19, 81] за случај аксијално притиснуте кутијасте структуре правоугаоног пресека. Ово је последица чињенице да се "хоризонталне" плоче извијају у правцу дејства земљине теже уместо у спољашњу страну пресека како је то добијено у случају разматраном у [19]. Одавде закључујемо да деформације "хоризонталних" плоча одређују и облик деформисања вертикалних плоча.



**Слика 5.2.3.1** Резултати статичког нумеричког прорачуна случај C1: а) померања у правцу  $z$ -осе, б) померања у правцу  $y$ -осе, ц) расподела Von Mises-ових напона; д) релативно померање у правцу  $z$ -осе чворова у равни симетрије ( $w/h$ ), случајеви C1a и C1б

Концентрација комбинованих Von Mises-ових напона може се приметити у средишњим зонама равни ослањања  $x=0$  и  $x=1,875m$ , као и на споју "хоризонталних" и бочних плоча секције 1.

Облици деформисања добијени у случајевима C1a и C1б су идентични, али су померања чворова добијена у случају C1б и до 20% већа него померања добијена у случају C1a (сл. 5.2.3.1д). Гравитационо оптерећење не може бити моделирано као

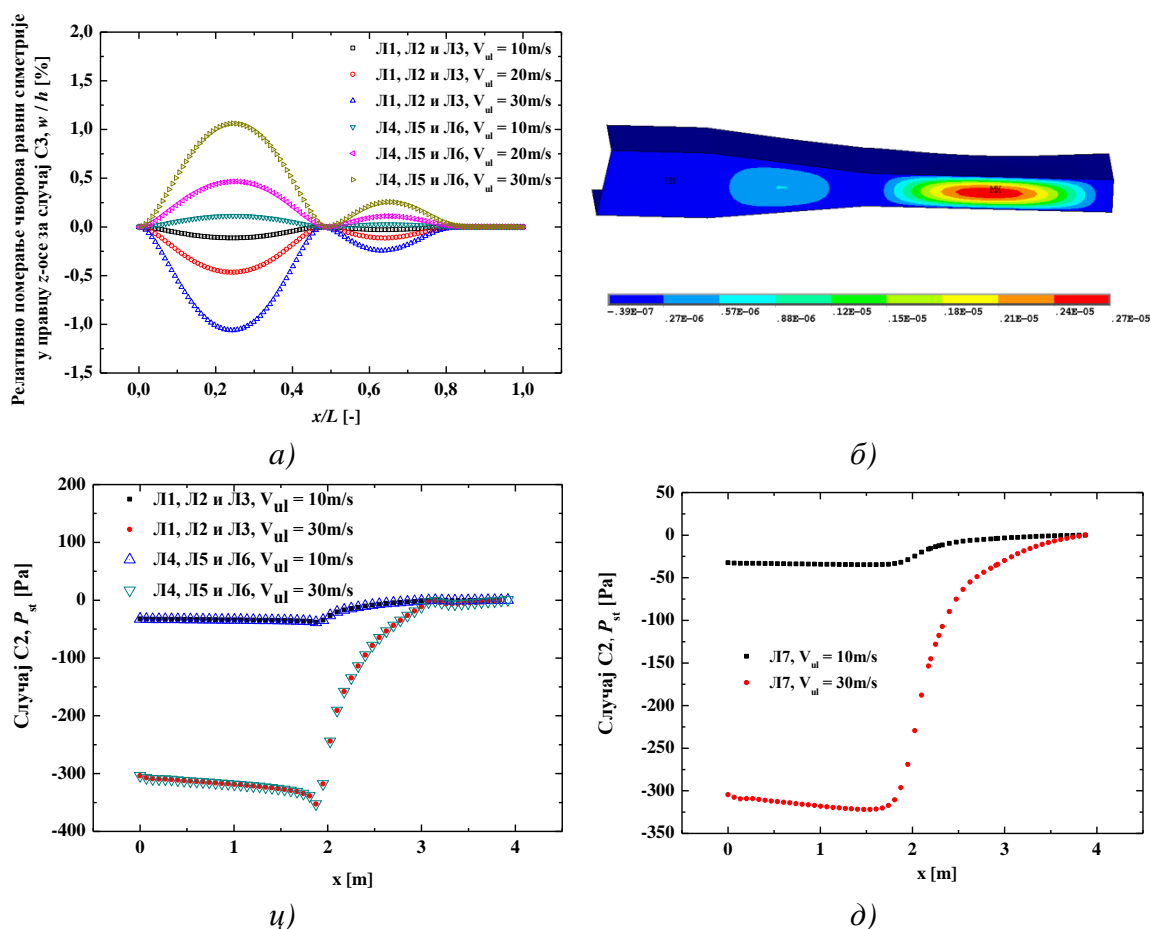
површинско оптерећење  $\rho gh \cdot dA$  јер се при деформисању елемент плоче помера те раван његове средње површи заклапа променљив угао са правцем дејства гравитације. Површинско оптерећење "прати" површину и остаје нормално на тангентну раван деформисане средње површи. При великим померањима елемента плоче не може се занемарити промена угла који нормала на тангентну раван средње површи елемента плоче (а тиме и правца дејства површинског оптерећења) заклапа са правцем дејства гравитације услед чега долази до појаве додатних момената савијања око остале две осе.

#### 5.2.4 Утицај развијеног струјног поља – линеарна анализа

Извршена је серија прорачуна (означена као случај С2) у циљу оцене деформације модела канала услед површинског оптерећења развијеног струјног поља за  $V_{ul} = 10$ - $30$  m/s, унето једносмерним спрезањем (*one-way coupling*) нумеричког прорачуна МКЗ и линеарног статичког прорачуна МКЕ, ЕТ2,  $F_{gm}^S = F_{gm}^F=2$ , МР1.

Резултати прорачуна случаја С2 приказани су на слици 5.2.4.1. "Хоризонталне" плоче канала заузимају облик полуталасне форме испупчене ка унутрашности канала (слика 5.2.4.1а). Максимална померања се остварују у средишту "хоризонталних" плоча секције 1 и крећу се од  $0,05\%h$  за брзину  $V_{ul} = 10$  m/s до  $0,3\%h$  за  $V_{ul} = 30$  m/s што је за ред величина мање од вредности добијених у случају С1. Расподела статичког притиска са променом  $V_{ul}$  је приказана на сл. 5.2.4.1ц и 5.2.4.1д. Најмање вредности статичког притиска остварују се пред промену пресека канала (прелазак из секције 1 у секцију 2) и крећу се од око  $-40$ Pa за брзину  $V_{ul} = 10$ m/s до  $-350$ Pa за  $V_{ul} = 30$ m/s (слике 5.2.4.1ц и 5.2.4.1д). Без обзира на ово, "вертикална" плоча секције 1 тежи ка полуталасној форми испупченој ка спољашности канала. Сагласност добијених померања са расподелом статичког притиска (слике 5.2.4.1а и 5.2.4.1ц) указује на усклађеност геометријских карактеристика дискретизационих мрежа са коришћеним моделом уноса – интерполације - спољашњег (притисног) оптерећења у структурални модел.



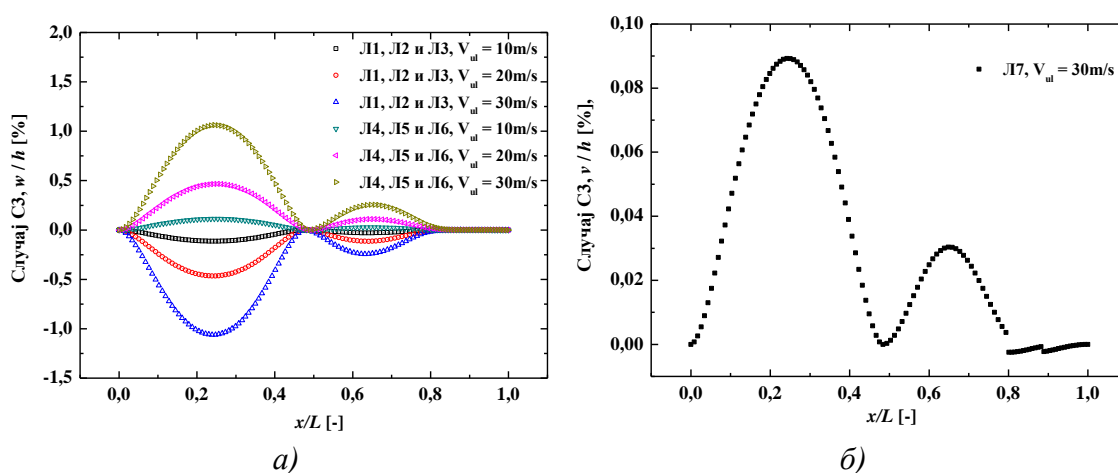


Слика 5.2.4.1 Резултати прорачуна случаја C2: а) релативна померања чворова у оси симетрије у правцу z-осе,  $V_{ul}=10\text{m/s}$  и  $V_{ul}=30\text{m/s}$ , б) померања структуре у правцу y-осе, ц) расподела статичког притиска у равни симетрије,  $V_{ul}=10\text{m/s}$  и  $V_{ul}=30\text{m/s}$ , д) расподела статичког притиска линија L7,  $V_{ul}=10\text{m/s}$  и  $V_{ul}=30\text{m/s}$

### 5.2.5 Утицај развијеног струјног поља – нелинеарна анализа

Извршена је серија нумеричких прорачуна (означена са случај C3) применом двосмерног спрезања (*two-way coupling*) нумеричких прорачуна нелинеарне статичке анализе МКЕ и МКЗ за развијене брзине  $V_{ul} = 10\text{--}30\text{ m/s}$  са преносом површинског отерећења, без утицаја гравитације и без термичког оптерећења,  $F_{gm}^S = F_{gm}^F = 2$ , MP1, KBC0. Случај C3 је различит од случаја C2 јер су у прорачуну узете у обзир нелинеарности по померањима (велика померања). Прорачуном добијено померање зида канала је искоришћено да се коригују координате

чворова струјног домена на површи додира са структуралним доменом, што доводи до промене расподеле статичког притиска, па се вредност притисног оптерећења локално повећава на месту веће дефлекције зида. Ово даље доводи до додатног повећања дефлекције зида тако да су добијене максималне вредности померања у правцу  $z$ -осе за  $V_{ul} = 30\text{m/s}$  и преко 3 пута веће него у случају стационарних нумеричких мрежа и достиже вредност од  $w \approx 1\%h$  (слика 5.2.5.1а), док је вредност максималног померања у правцу  $y$ -осе  $v \approx 0,1\%h$  (слика 5.2.5.1б).



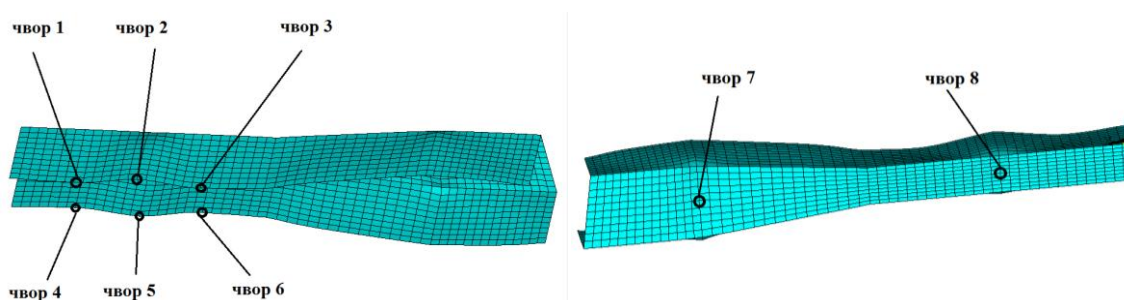
**Слика 5.2.5.1** Резултати прорачуна С3: а) релативно померање  $w/h$  [%] у правцу  $z$ -осе чворова структуре који се налазе у равни симетрије канала за  $V_{ul} = 10, 20$  и  $30\text{ m/s}$ , б) релативно померање  $v/h$  [%] у правцу  $y$ -осе чворова структуре који се налазе на линији Л7 за  $V_{ul} = 30\text{ m/s}$

Као што је већ објашњено у т. 5.2.3, притисно оптерећење "прати" деформисану површину плоче. Одавде се види да је потребно применити нелинеарну структуралну анализу и због тога што се плоче извијају (средња површ се помера и ротира) у мери да се то не може адекватно описати линеарном теоријом која претпоставља мала померања и мале углове ротације средње површи плоче.

Облици којима тежи структура у случају С3 су слични онима који се добијају за случај С2, са полуталасима испупченим ка унутрашњости канала за "хоризонталне" и ка спољашности канала за бочне плоче (слика 5.2.5.1). Максимално померање средње тачке "хоризонталне" плоче секције 1 расте са квадратом улазне брзине по зависности  $w/h$  [%] =  $-7,9295 \cdot V_{ul} + 0,00121 \cdot V_{ul}^2$ ,  $R^2 = 1$ .

### 5.2.6 Утицај термичког оптерећења канала

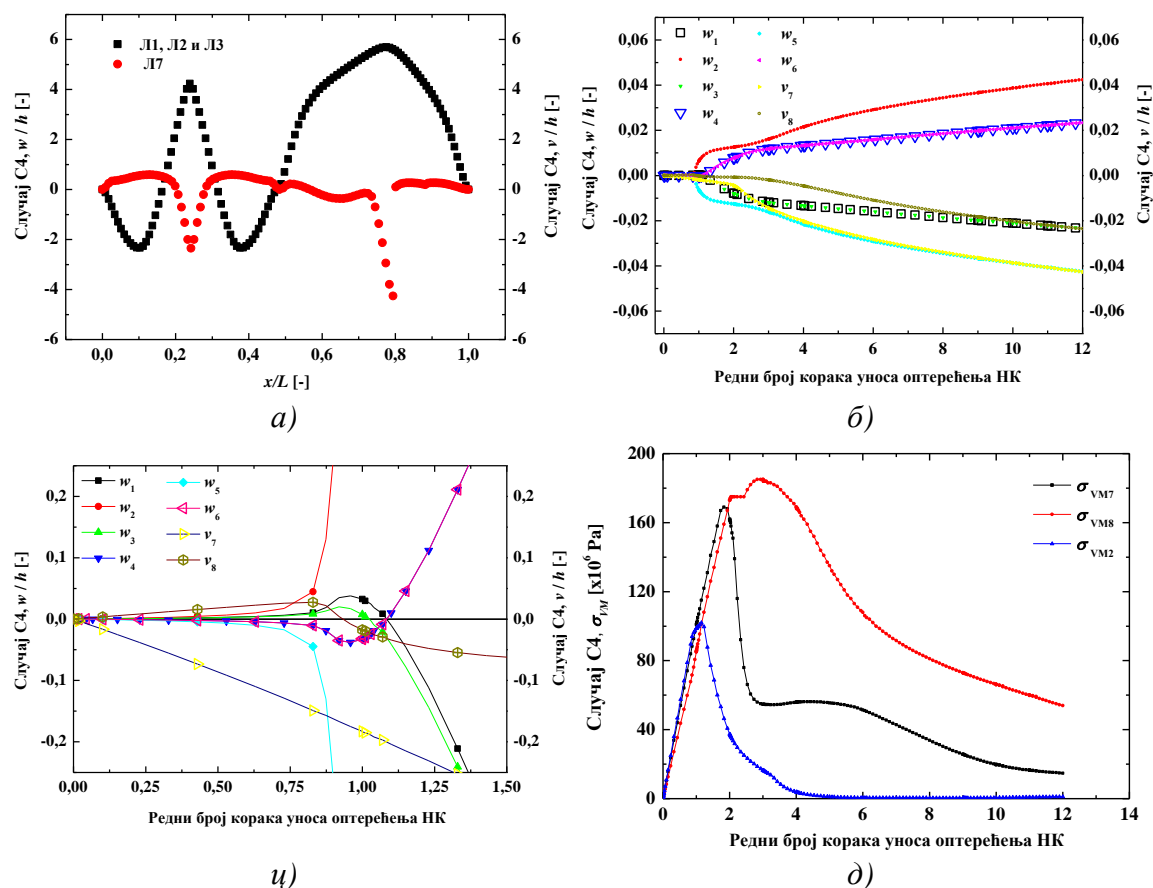
Серија прорачуна означена са случај С4 је извршена са циљем одређивања деформација термички оптерећеног канала,  $T_{un} = 300^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{un} - T_{sp} = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $F_{gm}^S = 2$ , КВС0. Током процеса уноса термичког оптерећења праћена су померања и промена *Von Mises*-ових напона у чворовима чији је положај приказан на слици 5.2.6.1.



**Слика 5.2.6.1** Положај чворова структуралне нумеричке мреже коначних елемената означених бројевима 1-8 чија су померања и промене *Von Mises*-ових напона праћени током процеса уноса оптерећења

Чворови 1 и 4 се налазе на  $\frac{1}{4}$  дужине "хоризонталних" плоча ( $x=0,46875\text{m}$ ), чворови 2 и 5 на  $\frac{1}{2}$  дужине ( $x=0,9375\text{m}$ ), чвор 6 на  $\frac{3}{4}$  дужине доње "хоризонталне" плоче ( $x=1,40625\text{m}$ ), док се чвор 3 налази на  $x=1,5067\text{m}$  од координатног почетка смештеног у средишту улазног пресека канала. Чворови означени бројевима 7 и 8 налазе се у  $x$ -у равни, први од њих у пресеку са спојем вертикалних плоча секција 2 и 3, а други на средини бочне плоче секције 1 са  $x=0,9375\text{m}$ . За чворове означене бројевима 1-6 праћено је померање  $w$  у правцу  $z$ -осе, за чворове означене са бројевима 7 и 8 померање  $v$  у правцу  $y$ -осе, а у чворовима означеним са 2, 7 и 8 је праћена промена *Von Mises*-ових напона  $\sigma_{VM}$ . Термичко оптерећење је у структурални модел унето кроз НК=12 једнаких корака, са промењивим бројем подкорака НПК, тако да је оптерећење унето кроз укупно 200 подкорака при чему је у сваком од подкорака унето по  $0,1^{\circ}\text{C} < \Delta T < 2,5^{\circ}\text{C}$  у односу на претходно конвергентно решење. Резултати прорачунатих померања и вредности  $\sigma_{VM}$  у чворовима за случај С4 приказани су на слици 5.2.6.2. Након завршеног целокупног прорачуна испуњавањем услова конвергенције, модел се деформисао тако да су плоче секције 1 заузеле облик форме са  $m = 3$  полуталаса у подужном и

$n = 1$  полуталасом у попречном правцу (сл. 5.2.6.2а), која је различита од форми добијених за претходне случајеве. Ова форма одговара 5-тој својственој форми вибрације (слика 5.2.1.2) и 3-ћој равнотежној форми (сл. 5.2.1.4).



**Слика 5.2.6.2** Резултати прорачуна за случај C4: а) померања чворова који се налазе у оси симетрије у правцу z-осе и померање чворова у равни  $z = 0$  у правцу y-осе, б) померања  $w_i$ ,  $i=1,6$  и  $v_j$ ,  $j=7,8$  посматраних чворова 1-8 током целокупног процеса уноса оптерећења, ц) померања посматраних чворова 1-8 током процеса уноса оптерећења  $0 < НК < 2,5$  (што одговара  $0^\circ\text{C} < T_{\text{un}} < 75^\circ\text{C}$ ), д) промена вредности Von Mises-ових напона  $\sigma_{VM}$  у посматраним чворовима 2, 7 и 8 са уносом термичког оптерећења

Криве померања чворова са уносом оптерећења су у већем делу опсега нелинеарне, са променом нагиба и постојањем више тачака прегипа у посматраном опсегу уноса оптерећења од 0-100% (слика 5.2.6.2б). За  $НК > 1$  ( $T_{\text{un}} = 25^\circ\text{C}$ ) криве померања чворова 1 и 4 (чворови који се налазе у равни симетрије на средини горње и доње "хоризонталне" плоче респективно, слика 5.2.6.1) имају прегипе при вредностима НК приближно једнаким 1,6; 2,0; 2,4; 3,0 и 4,0 које

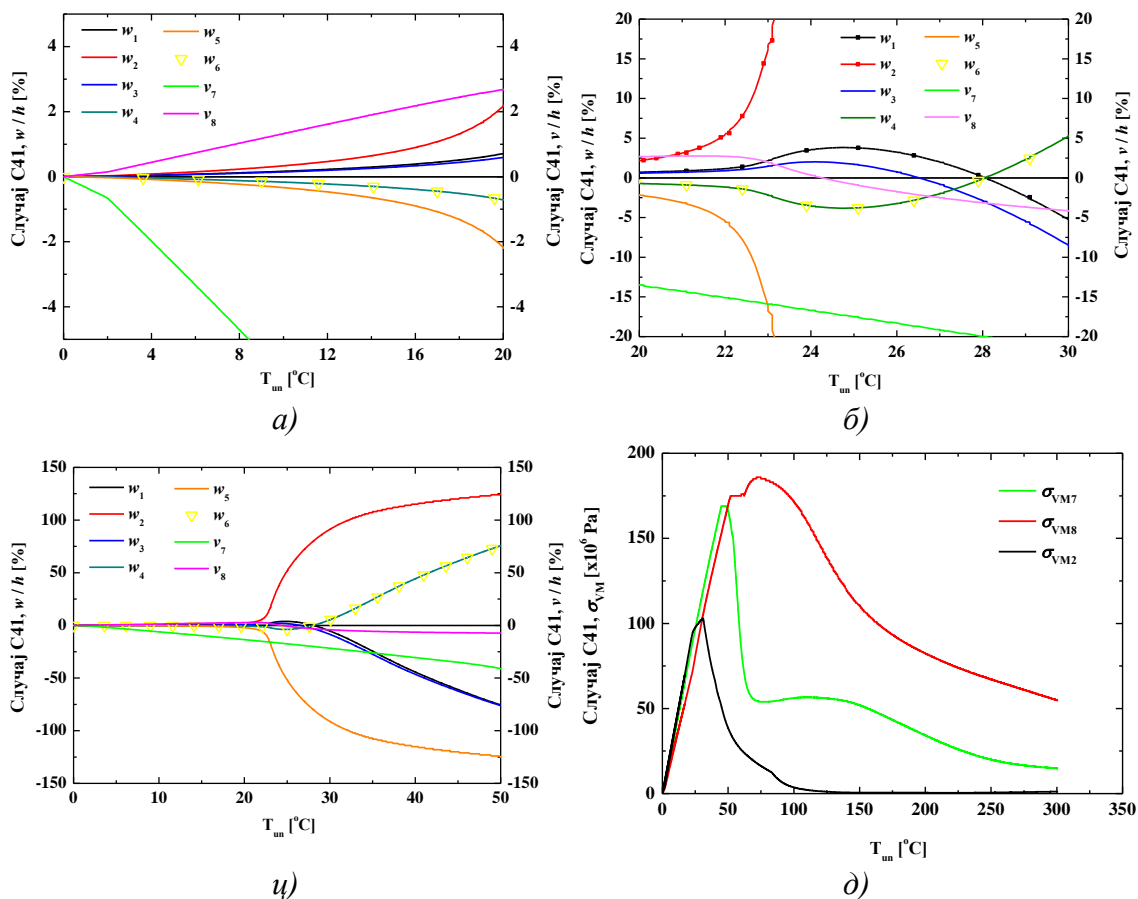
вредности одговарају  $T_{un} = 40, 50, 60, 75^{\circ}\text{C}$ . Оваква карактеристика кривих померања посматраних тачака са уносом оптерећења сугерише на појаву губитка стабилности плоче којој припада посматрани чвор. Међутим, овде то није случај, обзиром да померања посматраних чворова чине померања тачака посматране плоче услед унетог термичког оптерећења али и услед померања целе структуре (збирног одговора осталих плоча које чине посматрану структуру канала на унето оптерећење). Посматране криве за  $\text{НК} > 1$  не показују наглу промену градијента нити мењају знак остварене вредности, тј. чворови настављају да се померају на исту страну током даљег уноса оптерећења.

**Табела 5.2.6.1** Најмање разлике у вредностима  $T_{kr}$  суседних модова добијеним линеарном теоријом за "хоризонталну" плочу секције 1

Поглавље	Једначина	$\Delta T_{kr} [^{\circ}\text{C}]$	Суседни модови ( $m,n$ )
<b>2.2.1</b>	2.2.4	2,9	(1,2) и (2,2)
<b>2.2.2</b>	2.2.7	0,6	(1,1) и (2,1)
<b>2.2.3</b>	2.2.10	0,5	(2,2) и (3,2)
<b>2.2.4</b>	2.2.12	1,3	(3,2) и (4,2)

У почетном делу прорачуна чворови 2 и 5 (средишта "хоризонталних" плоча секције 1) се померају ка спољашности канала, до око  $0,05\%h$ . Истовремено, чвор број 8 (средиште бочне плоче секције 1) се такође помера ка спољашности канала. При постизању  $\text{НК} \approx 0,8$  ( $T_{un} = 20^{\circ}\text{C}$ ) чвор бр. 8 мења смер и почиње да се креће ка унутрашњости канала, док се вредност помераја чворова 2 и 5 нагло повећава. Чворови означени бројевима 1 и 3 као и 4 и 6 се са уносом оптерећења померају ка спољашности канала, у позитивном, односно негативном смеру  $z$ -осе, да би око вредности  $\text{НК} \approx 0,9$  ( $T_{un} = 22,5^{\circ}\text{C}$ ) кренули у супротним смеровима и наставили да се померају ка унутрашњости канала до краја процеса уноса оптерећења (слика 5.2.6.2ц). За то време, чворови 2 и 5 се све време померају у исту страну, ка спољашности канала. Ово понашање посматраних чворова указује да се "хоризонталне" плоче секције 1 са уносом оптерећења прво деформишу у форму облика (1,1) сличну првој својсвеној форми (слика 5.2.1.2), а затим нагло прелазе у форму (3,1) сличну 5-тој својственој форми. Бочна плоча секције 1 се понаша слично "хоризонталним" плочама заузимајући форму (3,1) на крају процеса уноса

оптерећења. Бочне плоче секција 2 и 3 заједно заузимају форму (1,1) са зоном највећег померања на њиховом споју. Чворови број 4 и 6, чије су  $x$  координате идентичне, остварују током процеса уноса оптерећења идентичне вредности померања у  $z$ -правцу. Чвор означен бројем 7, односно спој бочних страница секција 2 и 3, се од почетка уноса оптерећења креће ка унутрашњости канала.



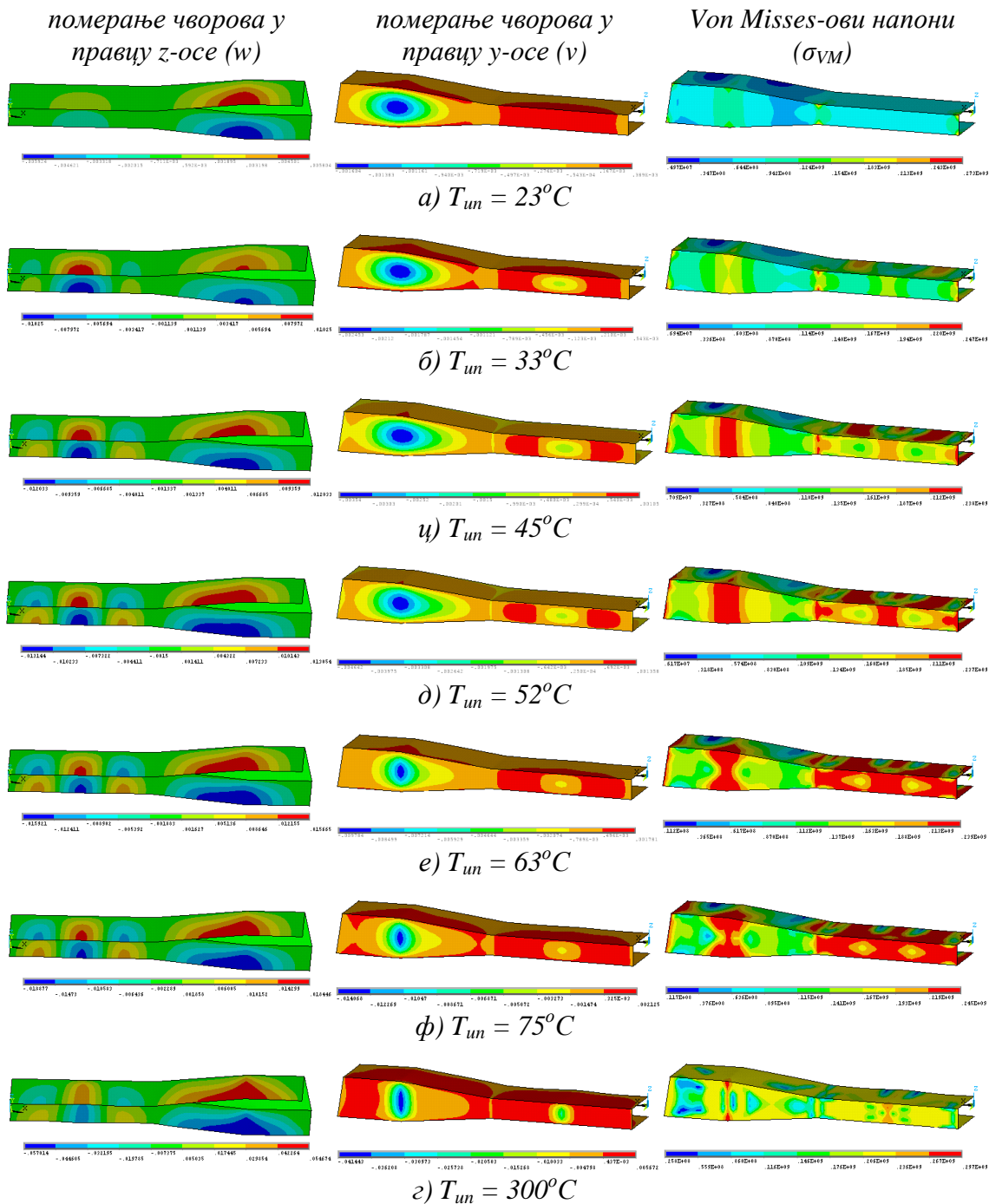
**Слика 5.2.6.3** Померања посматраних чворова 1-8 током процеса уноса оптерећења за случај C41: а)  $0^\circ\text{C} < T_{un} < 2^\circ\text{C}$ , б)  $20^\circ\text{C} < T_{un} < 30^\circ\text{C}$ , ц)  $0^\circ\text{C} < T_{un} < 50^\circ\text{C}$ ; д) промена вредности Von Mises-ових напона  $\sigma_{VM}$  у посматраним чворовима 2, 7 и 8 са уносом термичког оптерећења

Са уносом термичког оптерећења вредност Von Mises-ових напона  $\sigma_{VM2}$  у чвору 2 расте линеарно од НК=0 до НК $\approx$ 1 до вредности око  $1 \cdot 10^8$  Pa а затим нагло пада скоро до нуле, јер је дошло до извијања и растеређивања "хоризонталне" плоче секције 1 (слика 5.2.6.2 д). Напон  $\sigma_{VM7}$  у чвору 7 расте линеарно да би при НК $\approx$ 1,9 ( $T_{un} = 47,5^\circ\text{C}$ ) нагло опао до вредности од око  $0,6 \times 10^8$  Pa, на којој остаје до НК=6

( $T_{un} = 150^{\circ}\text{C}$ ), а затим даље наставља да пада са уносом оптерећења до вредности од  $0,2 \times 10^8$  Ра. Напон  $\sigma_{VM8}$  у чвору 8 након линеарног повећања до  $NK \approx 2$  задржава постигнуту вредност од око  $1,75 \times 10^8$  Ра све до корака  $NK \approx 2,4$ , затим нелинеарно расте до  $NK \approx 2,8$  ( $T_{un} = 70^{\circ}\text{C}$ ) а након тога опада до краја процеса уноса термичког оптерећења.

Према резултатима датим у т.5.2.1 прва основна равнотежна форма се постиже при својственој вредности од  $T_{un} = T_{kr1} = 19,43^{\circ}\text{C}$ , док је разлика између прве две својствене вредности  $\Delta T_{kr} = T_{kr2} - T_{kr1} = 3,2^{\circ}\text{C}$ . Најмање разлике у вредностима  $T_{kr}$  суседних модова добијеним линеарном теоријом за "хоризонталну" плочу секције 1 за различите услове ослањања, за све могуће комбинације полуталаса у подужном правцу  $m$  и полуталаса у попречном правцу плоче  $n$ , приказане су у табели 5.2.6.2. На добијених вредности би се могло претпоставити да је најмањи подкорак уноса оптерећења  $НПК_{min}$  који би требало да обезбеди да при уносу оптерећења не "прескочимо" мод  $(m,n)$  кроз који плоча при оптерећивању може да прође, треба да задовољи  $НПК_{min} < 0,5^{\circ}\text{C}$ . Стога је спроведен прорачун означен са С41 код којег је  $NK=300$  и  $НПК=5 \div 15$ , што одговара кораку уноса термичког оптерећења од  $0,01^{\circ}\text{C} < \Delta T < 0,2^{\circ}\text{C}$ . Резултати добијени прорачуном С41 су приказани на слици 5.2.6.3. и идентични су резултатима за случај С4, што указује на независност овог прорачуна од тестираних величина корака уноса оптерећења. Са уносом оптерећења до  $T_{un} \approx 20^{\circ}\text{C}$  чворови број 1-6 и 8 се крећу ка спољашности канала јер плоче секције 1 теже да заузму форме (1,1) испупчене ка спољашности (слика 5.2.6.3 а). Чвор број 7 који се налази на споју бочних плоча 2 и 3 помера се ка унутрашњости канала током целог поступка уноса оптерећења. Примећујемо да се чворови померају у одређеном смеру од самог почетка уноса оптерећења услед чињенице да померање чворова није само последица понашања плоче којој припада, већ и одговора целокупне структуре на унето оптерећење. Тако се на пример чвор број 2 помера у позитивном смеру  $z$ -осе, дакле у спољашњу страну канала и због ширења бочних страна секције 1 у попречном правцу (у правцу  $z$ -осе).

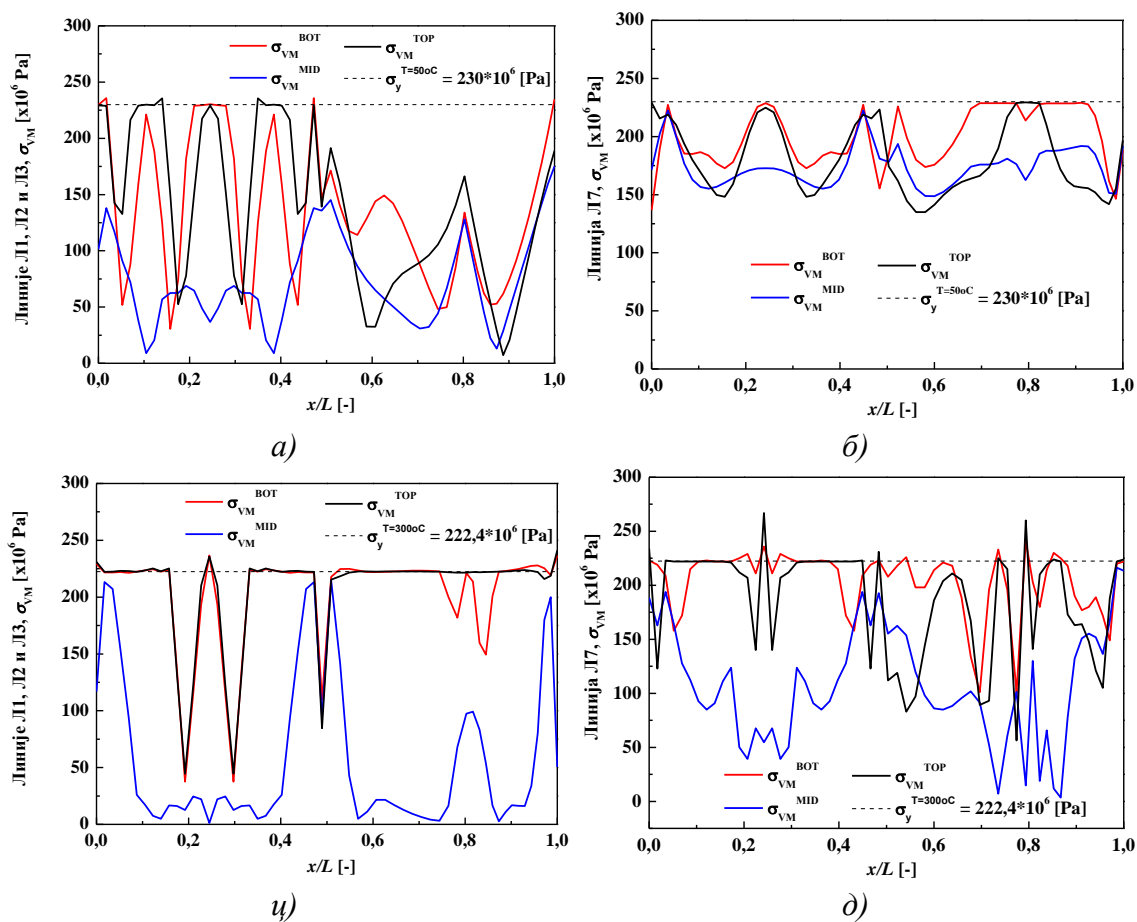
Слично томе, померање чвора 8 у спољашњу страну канала је последица ширења "хоризонталних" плоча секције 1 у попречном правцу у-осе.



Слика 5.2.6.4 Равнотежне форме остварене током процеса уноса оптерећења за случај С41: лева колона - померање чворова у правцу z-осе  $w$  [m], средња колона - померање чворова у правцу у-осе  $v$  [m], десна колона – расподела Von Mises-ових напона  $\sigma_{VM}$  [Pa]



Прорачунато померање чвора 2 за  $T_{un} = 0,02^\circ\text{C}$  је  $UZ_{2, T_{un} = 0,02^\circ\text{C}} = 2,5 \cdot 10^{-8}\text{m}$  (слика 5.2.6.3 а), док издужење материјалне нити која припада бочној плочи и пролази кроз њено средиште и чвор 8, у позитивном правцу  $z$ -осе, износи  $0,5 \cdot b_{bpl1} \cdot \alpha \cdot \Delta T = 0,13[\text{m}] \cdot 19 \cdot 10^{-6}[\text{K}^{-1}] \cdot 0,02[^\circ\text{C}] = 4,94 \cdot 10^{-8}\text{m}$ , где је  $b_{bpl1}$  – ширина бочне плоче секције 1,  $\alpha$  – коефицијент термичког ширења,  $\Delta T = T_{un}$ .



Слика 5.2.6.5 Распореда Von Mises-ових напона  $\sigma_{VM}$  [Pa] на линијама Л1-Л3 и линији Л7 након завршетка процеса уноса оптерећења од  $T_{un} = 50^\circ\text{C}$  (а, б), случај С42 и  $T_{un} = 300^\circ\text{C}$  (ц, д), случај С41

Због услова симетрије, разлика ове две вредности је могла да буде остварена само кроз померање тачака посматране нити у правцу  $y$ -осе, односно извијања бочне плоче у спољашњу страну канала. Аналогно, ширење "хоризонталних" плоча секције 1 у попречном правцу (правац  $y$ -осе) утиче на облик који заузимају бочне плоче секције 1 при уносу оптерећења. Можемо сматрати да "хоризонталне" плоче секције 1 губе стабилност извијањем при постигнутом температурном оптерећењу

од  $T_{un} \approx 20^{\circ}\text{C}$  када померања чворова број 2 и 5 достиже вредност од  $w \approx 2,5\%h$  и након тога нагло расту (за  $T_{un} \approx 22^{\circ}\text{C}$  постижу  $w \approx 5\%h$  а већ при  $T_{un} \approx 23^{\circ}\text{C}$  постижу  $w > 15\%h$ , слика 5.2.6.3б). Ово је сагласно са вредности од  $19,43^{\circ}\text{C}$  добијеном за (т. 5.2.1) али је значајно веће од вредности добијене аналитички за случајеве самих плоча (т.2.2). Бочна плоча секције 1 губи стабилност при  $T_{un} \approx 23^{\circ}\text{C}$  када долази до промене у смеру кретања чвора број 8 (слике 5.2.6.3 а-б). Истовремено, промена *Von Misses*-ових напона  $\sigma_{VM}$  у чвору 2 из растуће линеарне постаје нелинеарна за  $T_{un} \approx 23^{\circ}\text{C}$  када долази до извијања и бочне плоче, а затим нагло пада при  $T_{un} \approx 33^{\circ}\text{C}$  (слика 5.2.6.3д). Без обзира на то што структура губи стабилност извијањем посматраних плоча, путање оптерећење структуре - померање чворова не показују постојање наглих и скоковитих прелазака из једног у другог равнотежно стање (слика 5.2.6.3ц). Вредност  $\sigma_{VM}$  у чвору 7 са уносом оптерећења линеарно расте до  $T_{un} \approx 45^{\circ}\text{C}$ , задржава постигнуту вредност до  $T_{un} \approx 48,5^{\circ}\text{C}$  а затим нагло пада до  $T_{un} \approx 75^{\circ}\text{C}$  одакле прво благо расте а затим пада до краја уноса оптерећења. Вредност  $\sigma_{VM}$  у чвору 8 се са уносом оптерећења линеарно повећава до  $T_{un} \approx 51^{\circ}\text{C}$ , затим остаје константна до  $T_{un} \approx 62,5^{\circ}\text{C}$ , након тога поново расте до  $T_{un} \approx 72,8^{\circ}\text{C}$ , где поново постаје константна и задржава ту вредност до  $T_{un} \approx 74,5^{\circ}\text{C}$ , а затим поново опада до краја процеса уноса оптерећења (слика 5.2.6.3 д). Закључак да плоче не губе стабилност наглим извијањем у области  $NK > 1$  потврђу и форме које заузима модел структуре током процеса уноса оптерећења, приказане на слици 5.2.6.4. Видимо да се, почев од  $T_{un} = 23^{\circ}\text{C}$  "хоризонталне" плоче секције 1 деформишу у форму  $(m, n) = (3,1)$  и да ову форму задржавају све до краја процеса уноса оптерећења. Идентично понашање имамо и за случај бочне плоче секције 1. Иако је у посматраним чворовима вредност напона увек  $\sigma_{VM} < 200 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ , дакле  $\sigma_{VM} < \sigma_y$  за температуре  $T_{un} < 75^{\circ}\text{C}$ , облици кривих приказаних на слици 5.2.6.3д указују на утицај појављивања пластичних деформација негде у структури канала. Десна колона слике 5.2.6.4 приказује промене расподеле *Von Misses*-ових напона у структури канала током процеса уноса оптерећења. За вредност  $T_{un} \approx 33^{\circ}\text{C}$  када долази до извијања бочне плоче и наглог пада вредности  $\sigma_{VM}$  у посматраном чвору 2, остварују се напони са вредностима  $\sigma_{VM} > \sigma_y$  у ћошковима плоча секције 1 (слика 5.2.6.4б). Са даљим

уносом оптреређења те зоне се проширују ка средишту првенствено бочне плоче (слика 5.2.6.4ц за  $T_{un} = 45^{\circ}\text{C}$ ), када се појављују зоне са  $\sigma_{VM} > \sigma_y$  око споја бочних плоча секција 2 и 3 као и симетричне зоне у "хоризонталним" плочама секције 1.

**Табела 5.2.6.2** Вредности прорачунатих померања и Von Misses-ових напона у посматраним чворовима 1-8 за случајеве C4, C41 и C41, број извршених итерација и укупно време трајања прорачуна

Случај	$\widehat{w}_1$	$\widehat{w}_2$	$\widehat{w}_3$	$\widehat{w}_4$	$\widehat{w}_5$	$\widehat{w}_6$	$\widehat{v}_7$	$\widehat{v}_8$	$\sigma_{VM7}^*$	$\sigma_{VM8}^*$	$\sigma_{VM2}^*$
C4, $T_{un} = 300^{\circ}\text{C}$	-233,6	423,8	-232,8	233,6	-423,8	233,6	-425,5	-235,2	14,84	54,03	1,21
C41, $T_{un} = 300^{\circ}\text{C}$	-233,5	424,1	-232,8	233,5	-424,1	233,5	-425,6	-234,5	14,79	54,61	1,20
C4, $T_{un} = 50^{\circ}\text{C}$	-78,2	125,4	-78,6	78,2	-125,4	78,2	-43,3	-7,4	162,39	172,74	37,55
C41, $T_{un} = 50^{\circ}\text{C}$	-75,9	124,6	-76,5	75,9	-124,6	75,9	-41,4	-7,3	166,06	169,52	38,56
C42, $T_{un} = 50^{\circ}\text{C}$	-76,1	124,5	-75,5	75,5	-124,5	75,5	-41,5	-7,3	166,22	169,36	38,65
$G_{C4-C42}$	2,69	0,69	4,10	3,48	0,69	3,48	4,32	1,15	2,30	2,00	2,85
$G_{C41-C42}$	0,28	0,10	1,25	0,49	0,10	0,49	0,33	0,16	0,09	0,09	0,23
$G_{C4-C41}$	0,01	0,06	0,00	0,01	0,06	0,01	0,01	0,30	0,34	1,07	1,25

*Напомена:*

$\widehat{w}_i$  – померање  $i$ -тог чвора у правцу  $z$ -осе,  $i=1-6$ ,  $\widehat{w}_i = 100 \cdot w_i/h$  [%] за унето оптерећење  $T_{un}$ ,

$\widehat{v}_i$  – померање  $i$ -тог чвора у правцу  $y$ -осе,  $i=7,8$ ,  $\widehat{v}_i = 100 \cdot v_i/h$  [%] за унето оптерећење  $T_{un}$ ,

$\sigma_{VM}^*$  - Von Misses-ови напони у чворовима 2, 7 и 8 изражено у [ $10^6$  Pa],

$G_{C4-C42}$  – релативна разлика вредности добијене прорачуном C4 у односу на вредност добијене прорачуном C42 у [%],

$G_{C41-C42}$  – релативна разлика вредности добијене прорачуном C41 у односу на вредност добијене прорачуном C42 у [%],

$G_{C4-C41}$  – релативна разлика вредности добијених прорачунима C4 и C42 у [%].

Дакле, почевши од  $T_{un} = 33^{\circ}\text{C}$ , појаве нелинеарости материјала утичу на понашање како сваке од плоча тако и целе структуре. Линије померања чворова се могу истовремено сматрати и као приказ равнотежних стања система за које је прорачун напонско-деформационих величина исконвергирао, па облици добијених кривих потврђују закључак да у систему током поступка оптерећивања структуре не долази до скоковитих пролаза кроз равнотежна стања. Решавајући нумерички статичке [49, 78, 79] или динамичке проблеме [57, 60, 88, 90, 92] термички оптерећених правоугаоних плоча са различитим граничним условима ослањања, са или без аеродинамичког оптерећења, различити аутори су

користили у својим прорачунима различите вредности корака уноса оптерећења  $\Delta T$ , које су се кретале од неколико десетих до неколико хиљадитих делова  $^{\circ}\text{C}$ , све у зависности од проблема који је моделиран и захтева за нумеричком стабилности и тачности прорачуна. У намери да потврдимо закључак о независности решења од вредности  $\Delta T < 1^{\circ}\text{C}$  за наш случај, али и закључке везано за понашање плоча и целе структуре у опсегу  $0\text{-}20^{\circ}\text{C}$ , извршен је прорачун са  $\Delta T = 0,01^{\circ}\text{C}$  означен са С42 до нивоа оптерећења од  $50^{\circ}\text{C}$ . Истовремено, у овом случају је критеријум конвергенције по свим параметрима поштрен са  $10^{-4}$  на  $10^{-6}$ . Резултати добијени за случај С42 се веома добро слажу са резултатима добијеним прорачунима С4 и С41 у посматраном опсегу  $0\text{-}50^{\circ}\text{C}$ . Расподела *Von Mises*-ових напона  $\sigma_{\text{VM}}$  у чворовима горње, средње и доње површи коначних елемената који припадају линијама Л1, Л2 и Л3 и линији Л7 након уноса оптерећења  $T_{\text{un}} = 50^{\circ}\text{C}$  у случају С42 приказана је на сликама 5.2.6.5а и 5.2.6.5б, а након уноса оптерећења  $T_{\text{un}} = 300^{\circ}\text{C}$  у случају С41 на сликама 5.2.6.5ц и 5.2.6.5д респективно. Вредности  $\sigma_{\text{VM}}^{\text{MID}}$  у средњој површи коначних елемената које сече равни симетрије су два пута нижа од  $\sigma_y^{T=50^{\circ}\text{C}} = 230 \cdot 10^6 \text{ Pa}$  (сл. 5.2.6.5а) што је приближна вредност  $\sigma_y$  за  $T_{\text{un}} = 50^{\circ}\text{C}$ . Са повећањем  $T_{\text{un}}$  вредности  $\sigma_{\text{VM}}^{\text{MID}}$  се чак и смањују (сл. 5.2.6.5ц), сем за елементе који се налазе близу ослонаца укљештења као и споја секција 2 и 3. Са друге стране, вредности *Von Mises*-ових напона на спољашним  $\sigma_{\text{VM}}^{\text{TOP}}$  и унутрашњим  $\sigma_{\text{VM}}^{\text{BOT}}$  површинама коначних елемената који се налазе у зони ослонаца али и у зони тачака са највећим померањима плоча секције 1 су у нивоу са вредности  $\sigma_y^{T=50^{\circ}\text{C}}$ . Са повећањем  $T_{\text{un}}$  зоне са коначним елементима код којих  $\sigma_{\text{VM}}^{\text{TOP}}$  и  $\sigma_{\text{VM}}^{\text{BOT}}$  достижу или чак прелазе вредност  $\sigma_y^{T=300} = 222,4 \cdot 10^6 \text{ Pa}$  (вредност  $\sigma_y$  за  $T_{\text{un}} = 300^{\circ}\text{C}$ ) се проширују све до ослонаца, како се види на сликама 5.2.6.5ц и 5.2.6.5д, као и на сликама 5.2.6.4д и 5.2.6.4г. Вредности  $\sigma_{\text{VM}}^{\text{MID}}$  у средњој површи коначних елемената који леже на линији Л7 су веће од вредности  $\sigma_{\text{VM}}^{\text{MID}}$  за елементе у равни симетрије, али и даље ниже од  $\sigma_y^{T=50^{\circ}\text{C}}$  (сл. 5.2.6.5б) сем у зонама блиским ослонцима. Са повећањем  $T_{\text{un}}$  вредности  $\sigma_{\text{VM}}^{\text{MID}}$  се такође смањују (сл. 5.2.6.5д). Зоне са вредностима  $\sigma_{\text{VM}}^{\text{TOP}}$  и  $\sigma_{\text{VM}}^{\text{BOT}}$  већим од  $\sigma_y$  се проширују ка ослонцима са повећањем  $T_{\text{un}}$ , а у узаним зонама око чворова 7 и 8 чак прелазе вредност од  $250 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ .

Из овога се може закључити да је промена  $\sigma_{VM}$  кроз пресек коначног елемента интензивна, да постоје зоне са коначним елементима чија је једна површина оптерећена на истезање а супротна на притисак таквог нивоа да изазивају појаву пластичних деформација у тим површинама већ од нивоа термичког оптерећења од 50°C. Површине коначног елемента трпе истезање или притисак у зависности од његовог положаја у структури и нивоа термичког оптерећења.

**Табела 5.2.6.3 Основне карактеристике нумеричких прорачуна C4, C41 и C42**

Случај	број корака	$\Delta T_{un\ max}$ [°C]	$\Delta T_{un\ min}$ [°C]	број итерација	време прорачуна
C4, $T_{un} = 300^{\circ}C$	200	2,53	0,05	660	1h 53min
C41, $T_{un} = 300^{\circ}C$	4717	0,2	0,01	10322	22h 37min
C4, $T_{un} = 50^{\circ}C$	40	2,5	0,05	133	-
C41, $T_{un} = 50^{\circ}C$	737	0,2	0,01	1706	-
C42, $T_{un} = 50^{\circ}C$	905	0,2	0,003	1966	10h 35min

У табели 5.2.6.2. су дате вредности прорачунатих померања и *Von Mises*-ових напона у посматраним чворовима 1-8 за случајеве C4, C41 и C41. Вредности прорачунатих померања за случајеве C4 и C41 су скоро идентичне, са релативном разликом од 0-0,3%, док се релативна разлика  $\sigma_{VM}$  у посматраним чворовима за ова два случаја кретала од 0,3-1,6%. Релативна разлика вредности прорачунатих померања у посматраним чворовима случаја C4 у односу на вредности прорачунате у случају C42 су се кретале у опсегу 0,7-4,3%, са најмањим одступањима у чворовима 2 и 4 који су остварили највеће вредности померања у правцу *z*-осе, а за прорачунате вредности  $\sigma_{VM}$  релативно одступање резултата ова два прорачуна је било од 2% до 2,8%. Са повећањем броја НК, тј. са смањењем  $\Delta T$  у случају C41, ова релативна разлика пада на вредности 0,1-1,3% по померањима и 0,3-1,3% по  $\sigma_{VM}$ .

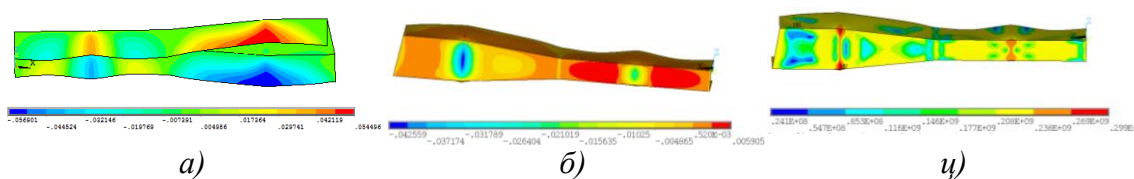
Овде морамо истаћи и чињеницу да повећање броја итерација за исти број НК не доводи до побољшања или чак остваривања услова конвергенције, док повећање броја НК и уз релативно мали, али потребан број итерација по једном кораку уноса оптерећења то омогућује. Из свега изнетог можемо закључити да добијени резултати потврђују испуњеност услова конвергенције прорачуна са смањењем

корака уноса оптерећења и потребу за пажљивом дискретизацијом уноса термичког оптерећења преко БК и БПК.

Основне карактеристике нумеричких прорачуна С4, С41 и С42 дате су у табели 5.2.6.3. Видимо да је време потребно за спровођење прорачуна у случају С4 десет пута краће него у случају С41 и преко 20 пута краће него што би било време прорачуна за случај С42 до  $T_{un} = 300^{\circ}\text{C}$ . На основу претходног закључка и вредности за потребно време прорачуна сваког од нумеричких случајева, претпоставићемо да би у нашем случају вредност  $\Delta T = 1^{\circ}\text{C}$  требала да буде адекватна у циљу добијања конвергентног резултата нумеричког прорачуна модела термички оптерећене структуре канала методом коначних елемената са прихватљивим временом потребним за спровођење овог прорачуна.

### 5.2.7 Канал при секвенцијалном гравитационом и термичком оптерећењу

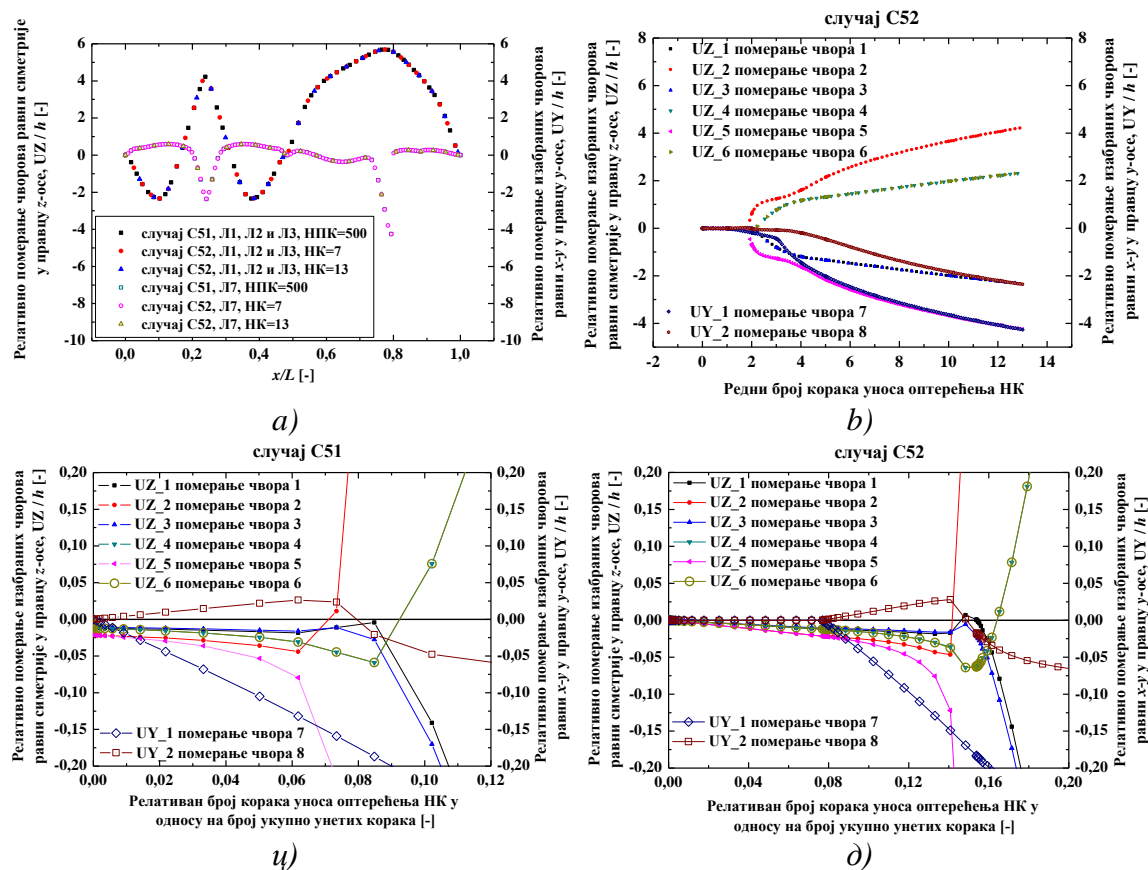
И овом поглављу су приказани резултати нумеричког прорачуна модела секвенцијално оптерећеног прво гравитационом а затим термичким оптерећењем у структурални модел коначних елемената,  $T_{un} = 300^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{un} - T_{sp} = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $F_{gm}^S = 2$ , КВС0, означен са случај С5.



Слика 5.2.7.1 Деформисање канала за случај С5,  $T_{un} = 300^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{un} - T_{sp} = 0^{\circ}\text{C}$

Прорачуни са НК=2 корака уноса оптерећења (први за гравитационо и други за термичко) са по НПК = 200 и 500 подкорака (означен као случај С51) су прекинути испуњавањем услова остваривања укупног броја подкорака, док је прорачун са 1000 подкорака прекинут услед дивергенције. Облик форме и интензитет деформисања структуре у прва два случаја је идентичан и приказан је преко померања у правцу  $z$  и  $y$  осе на сликама 5.2.7.1 а) и б) за случај са НПК=500

подкорака, док је на слици 5.2.7.1 ц) приказана расподела *Von Mises*-ових напона у деформисаној структури. Добијени облици деформисања су скоро истоветни са облицима добијеним у случају С4 (сл. 5.2.6.1).



**Слика 5.2.7.2** Померања чворова нумеричке мреже добијене прорачуном С5: а) С51 и С52 за чворове који леже на линијама Л1, Л2, Л3 и Л7, б) С52 за посматране чворове 1-7 током уноса оптерећења кроз НК=13 корака, ц) С51 померање посматраних чворова током уноса оптерећења кроз кораке  $0 < \text{НК} < 0,12$ , д) С52 померање посматраних чворова током уноса оптерећења кроз кораке  $0 < \text{НК} < 0,2$

Због проблема са конвергенцијом при броју подкорака уноса оптерећења  $\text{НПК} < 200$  и  $\text{НПК} > 500$ , спроведени су прорачуни означени са С52 где је унос температурног оптерећења спроведен у  $\text{НК} = 7$  и  $13$  једнаких корака, дакле са величином корака уноса од  $\Delta t_{\text{рк}} = 50^\circ\text{C}$  и  $25^\circ\text{C}$  респективно, при чему је гравитационо оптерећење унето у потпуности у првом кораку. У оба случаја су добијене исте форме и интензитети деформација као и у случају С51 приказаном на сл. 5.2.7.1

На слици 5.2.7.2а приказана су померања чворова у равни симетрије ( $y=0$ ) који леже на линијама Л1, Л2, Л3 и чворова који леже на линији Л7 ( $z=0$ ), добијена прорачуном за случајеве С51 и С52. Видимо да су померања посматраних чворова идентична. Плоче секције 1 заузимају форме са по три полуталаса у подужном и по једним полуталасом у попречном правцу. Узана зона споја бочних плоча зоне 2 и зоне 3 се деформише ка унутрашњости канала са померањем чворова и преко  $4h$ . У тој зони долази до појаве комбинованих *Von Mises*-ових напона са вредностима од  $3 \cdot 10^8 \text{Pa}$ , које су веће од  $\sigma_Y$  за температуру  $T=300^\circ\text{C}$  (сл. 5.2.7.1ц).

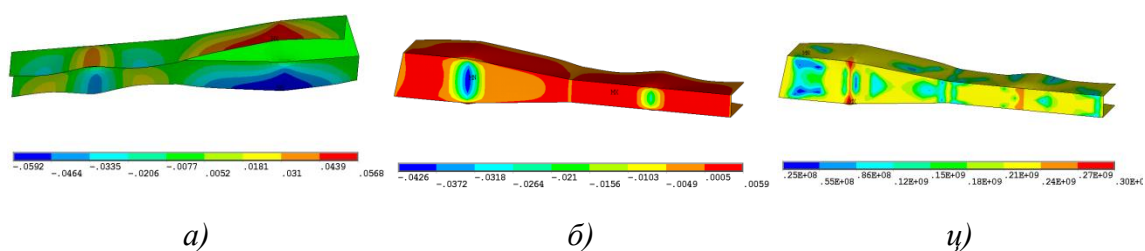
Након уноса око 7-8% укупног термичког оптерећења ( $21-24^\circ\text{C}$ ) долази до интензивније дефлекције тачака хоризонталних плоча секције 1, што се примећује преко наглог повећања померања тачака 1 и 5, слика 5.2.7.2б. Поставља се питање оптималне величине корака уноса оптерећења температуре и вредности параметара конвергенције постављених како по померањима тако и по силама и моментима у чворовима, који ће обезбедити да се прорачуном не изгубе нека равнотежна стања кроз која би требало да се налазе на путањи равнотежних стања структуре. Ако је тај корак превише велики и/или услови конвергенције недовољно оштри (узимају превелике вредности), прачун ће неминовно прећи на друго равнотежно стање које му је у домету или дивергирати ако не постоји равнотежно стање у домету унетог корака и услова конвергенције. Са друге стране, превише мали корак уноса оптерећења и/или превише захтевни услови конвергенције (веома малих вредности) поред значајног продужавања времена прорачуна најчешће повећавају и вероватноћу појаве дивергенције прорачуна, посебно у случају ређих нумеричких мрежа.

#### *5.2.8 Унос једносмерног притисног а затим термичког оптерећења у модел структуре канала*

Шема једносмерног уноса притисног оптерећења у структурални модел за развијене брзине  $V_{ul} = 10, 20$  и  $30 \text{ m/s}$  а затим термичког оптерећења,  $T_{un} = 300^\circ\text{C}$ ,  $T_{un} - T_{sp} = 0^\circ\text{C}$ , без дејства гравитације,  $F_{gm}^S = F_{gm}^F = 2$ , МР1, КВС0, означена је са

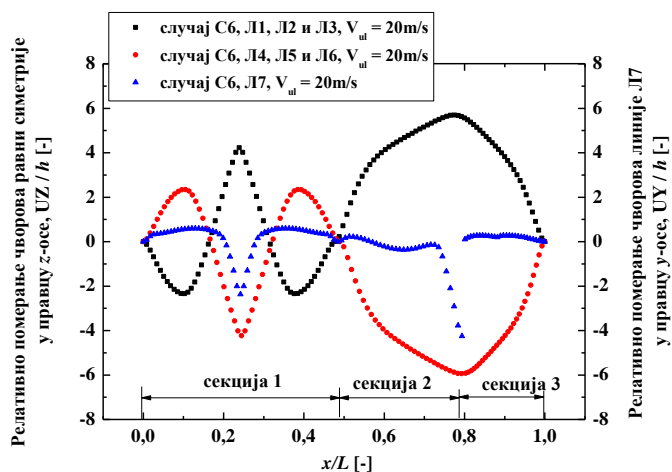


случај С6. На слици 5.2.8.1 су приказана померања и напони у деформисаној структури канала подвргнутој прво једносмерном преносу притисног оптерећења развијене струје кроз недеформисани канал (т.4.2), а затим термичком оптерећењу  $T_{un}=300^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{un} - T_{sp} = 0^{\circ}\text{C}$ , за брзину  $V_{ul} = 30 \text{ m/s}$ , без дејства гравитационог оптерећења. Облици деформисања остварени при свакој од вредности  $V_{ul} = 10, 20$  и  $30\text{m/s}$  су идентични.



**Слика 5.2.8.1** Резултати прорачуна С6 за  $V_{ul} = 30 \text{ m/s}$ ,  $T_{un} = 300^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{un} - T_{sp} = 0^{\circ}\text{C}$ , а) померања  $w$  у правцу  $z$ -осе [m], б) померања  $v$  у правцу  $y$ -осе [m], ц) комбиновани Von Mises-ови напони  $\sigma_{VM}$  [Pa]

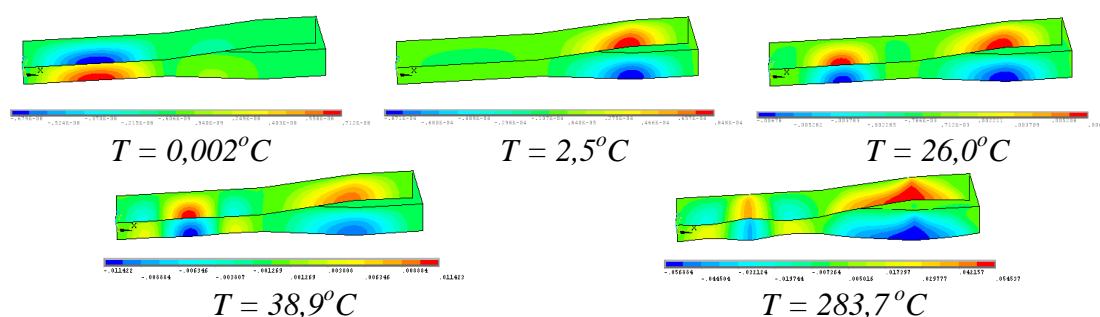
Прорачунате вредности померања у правцу  $z$  и  $y$  осе се минимално разликују тако да је допринос равномерног притисног оптерећења развијене струје кроз канал у остваривању вредности дефлекције плоча занемарљив.



**Слика 5.2.8.2** Померања  $w$  у правцу  $z$ -осе чворова у равни симетрије ( $y=0$ ) и померања  $UY$  у правцу  $y$ -осе чворова у равни  $x$ - $y$  ( $z=0$ ) за случај С6 за  $V_{ul} = 20\text{m/s}$ ,  $T_{un}=300^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{un} - T_{sp} = 0^{\circ}\text{C}$ .

Видимо да се плоче секције 1 деформишу у облик који одговара 5-том сопственом моду неоптерећење структуре (сл. 5.2.1.2), као и да при овом нивоу оптерећења постоје зоне у структури канала где се остварује напон већи од границе еластичности за  $T_{un}= 300^{\circ}\text{C}$  (таб. 4.1.4). Обзиром да нема дејства гравитације, деформације структуре је симетрична у односу на  $x$ -у раван. Прорачуната померања су веома слична померањима добијеним у т.5.2 и т.5.3 како по облику тако и по оствареним вредностима. На слици 5.2.8.3 се виде фазе кроз које модел пролази током поступка уноса термичког оптерећења  $T_{un}=300^{\circ}\text{C}$ ,  $(T_{un} - T_{sp}) = 0^{\circ}\text{C}$ . Плоче хоризонталне секције 1 услед дејства равномерно расподељеног дејства струје се прво испупчују ка унутрашњости у форми (1,1), да би већ са  $T = 2,5^{\circ}\text{C}$  започеле да заузимају форму (3,1).

У случају само термички оптерећеног модела (т. 5.2.6.1) најинтензивније померање од самог почетка уноса оптерећења се примећује за тачку 7, за којом следе померања тачака горње "хоризонталне" плоче (слике 5.2.6.2 и 5.2.6.4), док се у овом случају прво испупчавају ка унутрашњости канала "хоризонталне" плоче секције 1 а тек онда се услед међусобног дејства са бочним плочама испупчавају ка спољашњости канала (слика 5.2.8.3).



**Слика 5.2.8.3** Деформације током уноса термичког оптерећења

Прорачун са НК = 1 и НПК = 100, 200, 300 није конвергирао, док је прорачун са НПК= 500 у томе успео. При даљем повећању броју подкорака уноса оптерећења 1000 и више, прорачун није конвергирао. Због проблема са конвергенцијом прорачун је морао да буде спроведен кроз 7 корака уноса оптерећења, први за

притисно и наредних 6 за термичко (50°C по кораку уноса термичког оптерећења са по 100 подкорака).

### 5.3 Резултати спрегнутих параметарских нумеричких прорачуна интеракције структуре канала и струје ваздуха са двосмерним преносом утицаја

У овом поглављу су представљени резултати спрегнутих параметарских нумеричких прорачуна са двосмерним преносом утицаја коришћењем софтверских пакета ANSYS и ANSYS CFX. На основу улазних параметара  $V_{ul}$ ,  $T_{un}$ ,  $T_{un} - T_{sp}$  и  $F_{gm}$  и добијених резултата за  $P_{ul} - P_{iz}$  и  $\sigma_{vmax}$  генерисане су базе података на основу којих су формиран модели фази логике (поглавље 6).

Основни резултати спрегнутих нумеричких прорачуна интеракције структуре термички оптерећеног канала са струјом ваздуха који протиче кроз канал дати су у табелама 5.3.1 – 5.3.5 за претпостављене вредности улазне брзине у канал  $V_{ul} = 10, 15, 20, 25$  и  $30\text{m/s}$  респективно. У Прилогу су у форми табела дате вредности параметара нумеричких прорачуна, резултати добијени сваким од прорачуна и дијаграми конвергенције за сваки нумерички случај. Са  $w^{+z}$  и  $w^{-z}$  су у овим табелама обележене највеће прорачунате вредности померања тачака структуре у позитивном и негативном смеру  $z$  – осе, са  $P_{st\ min}$  најмања вредност статичког притиска, а са  $V_{u\ max}$  – максимална вредност компоненте брзине у  $x$ -правцу остварена у струјном домену, у пресеку са највећим сужењем.

Канали остварују различите облике деформисања у зависности од термичког оптерећења и вредности  $V_{ul}$ . Основни облици у које се канали деформишу приказани су у табели 5.3.6, сврстани у три основне групе по колонама и обележени O1 – O12. Покушај да се одредити утицај вредности  $V_{ul}$  на остварени облик није био успешан, али се при  $V_{ul} = 10\text{m/s}$  појављују скоро сви облици приказани у табели 5.3.6, док се при  $V_{ul} = 30\text{m/s}$  чешће појављују облици испупчавања "хоризонталних" плоча секције 1 у форме (2,1) са два полуталаса у

правцу  $x$ -осе и једним полуталасом у правцу  $y$ -осе (форме O1, O5-O7, O9 и O10). На слици 5.3.1 су приказани облици деформисања за случај  $T_{un} = 300^{\circ}\text{C}$  и  $(T_{un} - T_{sp}) = 0^{\circ}\text{C}$  за различите вредности  $V_{ul}$ . При  $V_{ul} = 10\text{m/s}$  хоризонталне плоче секције 1 се деформишу у форму (2,1), док при  $V_{ul} = 20$  и  $30\text{ m/s}$  заузимају форму (3,1).

**Табела 5.3.1** Резултати параметарских прорачуна за улазну брзину  $V_{ul} = 10\text{m/s}$

Ознака	$T_{un}$	$(T_{un} - T_{sp})$	$F_{gm}$	$(P_{ul} - P_{iz})$	$\sigma_{VMmax}$	$w^{+z}$	$w^{-z}$	$P_{st\ min}$	$V_{u\ max}$
[-]	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	[-]	[Pa]	[ $\times 10^8\text{ Pa}$ ]	[ $\times 10^2\text{m}$ ]	[ $\times 10^2\text{m}$ ]	[Pa]	[m/s]
1001	372	54	1,5	-16,93	2,92	6,40	-5,45	56,85	13,69
1002	243	186	1,8	-22,60	2,43	3,36	-3,37	-61,41	13,73
1003	407	380	1,2	-27,09	2,94	4,04	-4,04	-79,39	14,43
1004	494	362	1,4	-25,83	2,48	4,91	-4,91	-95,94	15,28
1005	573	507	1,7	-10,97	2,60	4,03	-4,04	-65,14	14,62
1006	648	500	1,4	-23,64	2,54	5,42	-5,42	-105,35	15,85
1007	723	617	1,8	-18,19	2,65	5,27	-5,27	-96,11	15,73
1008	447	263	1,2	-26,93	2,60	4,72	-4,73	-92,57	15,17
1009	532	456	1,6	-19,64	2,55	4,69	-4,70	-84,82	15,05
1010	700	400	1,0	-13,08	2,54	5,83	-5,92	-83,81	15,45
1011	170	0	1,0	-34,14	2,49	4,02	-4,03	-62,81	11,79
1012	170	0	2,0	-30,86	2,71	3,99	-4,00	-57,63	12,36
1013	363	142	2,0	-16,92	2,93	4,55	-4,60	-54,80	13,77
1014	700	400	1,5	-8,03	2,81	5,89	-5,99	-85,27	15,76
1015	700	600	2,6	-15,90	2,74	5,11	-5,12	-90,30	15,60
1016	270	200	1,5	-23,21	2,42	3,60	-3,61	-66,69	13,89
1017	426	75	1,2	-21,09	2,77	6,84	-5,83	-64,27	13,79
1018	555	250	1,4	-17,37	2,82	5,67	-5,76	-70,25	14,49
1019	300	0	1,5	-26,20	2,85	5,67	-5,93	-58,68	13,12
1020	500	20	1,0	-28,20	2,59	7,97	-8,31	-72,23	13,78
1021	300	200	1,2	-27,64	2,50	3,89	-3,90	-75,97	14,18
1022	500	300	1,3	-25,90	2,64	5,06	-5,06	-98,85	15,41
1023	700	500	1,3	-23,50	2,51	5,74	-5,74	-116,45	16,42
1024	750	300	1,2	-16,42	2,67	6,92	-7,00	-81,80	15,20
1025	500	150	1,2	-28,13	2,74	6,25	-6,26	-77,46	14,15
1026	900	600	1,6	-16,35	2,66	6,40	-6,48	-120,15	16,98

**Табела 5.3.2** Резултати параметарских прорачуна за улазну брзину  $V_{ul} = 20\text{m/s}$

Ознака	$T_{un}$	$(T_{un} - T_{sp})$	$F_{gm}$	$(P_{ul} - P_{iz})$	$\sigma_{VMmax}$	$w^{+z}$	$w^{-z}$	$P_{st\ min}$	$V_{u\ max}$
[-]	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	[-]	[Pa]	[ $\times 10^8\text{ Pa}$ ]	[ $\times 10^2\text{m}$ ]	[ $\times 10^2\text{m}$ ]	[Pa]	[m/s]
1501	170	0	1,0	-70,78	2,49	4,02	-4,03	-135,67	19,35
1502	170	0	2,0	-61,78	2,71	3,99	-3,99	-120,91	19,34
1503	170	120	2,0	-56,44	2,42	2,84	-2,85	-127,07	19,93
1504	363	280	2,0	-50,33	2,50	4,07	-4,08	-165,22	21,57
1505	420	300	2,2	-51,66	2,54	4,48	-4,48	-186,62	22,28
1506	500	350	1,6	-49,46	2,55	4,95	-4,96	-208,48	22,93
1507	700	650	1,3	-56,08	2,61	5,11	-5,12	-224,41	23,22
1508	580	450	2,0	-45,39	2,58	5,06	-5,06	-207,96	23,16

1509	800	700	2,0	-44,29	2,70	5,32	-5,32	-221,26	23,65
1510	300	100	1,8	-58,50	2,82	4,55	-4,56	-142,42	20,29
1511	250	200	3,0	-43,99	2,50	3,33	-3,34	-130,52	20,57
1512	200	120	1,0	-67,47	2,41	3,24	-3,25	-153,39	20,36
1513	200	50	2,0	-59,85	2,72	3,81	-3,82	-129,10	19,77
1514	720	180	2,0	-52,48	2,97	7,38	-7,49	-177,21	21,86
1515	700	350	2,0	-50,32	3,05	6,20	-6,32	-177,21	21,86

**Табела 5.3.3** Резултати параметарских прорачуна за улазну брзину  $V_{ul} = 20\text{m/s}$

Ознака	$T_{un}$	$(T_{un} - T_{sp})$	$F_{gm}$	$(P_{ul} - P_{iz})$	$\sigma_{VMmax}$	$w^{+z}$	$w^{-z}$	$P_{st\ min}$	$V_{u\ max}$
[-]	[°C]	[°C]	[-]	[Pa]	[ $\times 10^8$ Pa]	[ $\times 10^2$ m]	[ $\times 10^2$ m]	[Pa]	[m/s]
2001	380	150	1,7	-104,04	2,89	5,02	-5,03	-280,62	27,59
2002	420	80	1,2	-119,70	2,77	6,72	-6,09	-284,42	27,21
2003	555	238	2,0	-99,77	3,08	5,87	-5,88	-323,47	29,16
2004	642	517	1,5	-82,60	2,56	5,26	-5,26	-392,47	31,15
2005	300	0	2,0	-101,37	2,99	5,68	-5,93	-359,60	28,99
2006	327	285	1,2	-116,08	2,45	3,78	-3,79	-300,90	28,09
2007	470	390	1,3	-109,80	2,49	4,59	-4,60	-356,60	29,56
2008	568	446	1,4	-45,87	2,56	5,10	-5,10	-381,73	33,20
2009	670	520	1,5	-80,62	2,56	5,43	-5,44	-407,54	31,58
2010	700	200	2,0	-96,57	3,04	7,15	-7,27	-317,92	29,09
2011	500	300	1,0	-105,12	2,52	4,70	-4,77	-286,49	27,47
2012	700	500	2,0	-24,39	2,61	5,59	-5,59	-414,02	34,93
2013	170	100	2,0	-102,94	2,52	2,99	-3,00	-236,31	26,73
2014	170	120	1,5	-102,49	2,39	2,85	-2,86	-228,95	26,26
2015	900	600	2,0	-76,20	2,74	6,40	-6,47	-474,73	33,66

**Табела 5.3.4** Резултати параметарских прорачуна за улазну брзину  $V_{ul} = 25\text{m/s}$

Ознака	$T_{un}$	$(T_{un} - T_{sp})$	$F_{gm}$	$(P_{ul} - P_{iz})$	$\sigma_{VMmax}$	$w^{+z}$	$w^{-z}$	$P_{st\ min}$	$V_{u\ max}$
[-]	[°C]	[°C]	[-]	[Pa]	[ $\times 10^8$ Pa]	[ $\times 10^2$ m]	[ $\times 10^2$ m]	[Pa]	[m/s]
2501	700	600	2,6	-114,68	2,71	5,14	-5,15	-579,90	38,63
2502	370	300	2,5	-124,10	2,54	4,04	-4,05	-439,99	35,58
2503	250	200	1,2	-188,78	2,41	3,40	-3,41	-434,70	34,11
2504	420	370	1,4	-178,60	2,50	4,22	-4,23	-518,27	35,97
2505	470	440	1,3	-178,15	2,52	4,31	-4,32	-531,62	36,22
2506	550	500	1,8	-142,59	2,61	4,61	4,62	-533,08	37,15
2507	600	550	3,2	-120,00	2,74	4,67	-4,68	-518,96	37,45
2508	720	680	1,5	-135,02	2,65	5,06	-5,06	-589,16	38,32
2509	170	100	2,2	-163,57	2,54	2,99	-3,00	-370,97	33,38
2510	700	400	2,0	-131,56	2,95	5,88	-5,98	-714,39	41,27
2511	300	250	1,5	-152,48	2,45	3,64	-3,65	-422,58	34,53
2512	600	550	1,5	-138,75	2,60	4,80	-4,80	-557,49	37,61
2513	170	150	2,0	-159,94	2,41	2,63	-2,64	-334,06	32,54
2514	250	180	2,0	-160,33	2,45	3,47	-3,48	-413,91	34,40
2515	320	200	2,0	-155,83	2,63	4,07	-4,08	-473,63	35,83

**Табела 5.3.5a** Резултати параметарских прорачуна за улазну брзину  $V_{ul} = 30m/s$

Ознака	$T_{un}$	$(T_{un} - T_{sp})$	$F_{gm}$	$(P_{ul} - P_{iz})$	$\sigma_{VMmax}$	$w^{+z}$	$w^{-z}$	$P_{st min}$	$V_{u max}$
[-]	[°C]	[°C]	[-]	[Pa]	[x10 <sup>8</sup> Pa]	[x10 <sup>2</sup> m]	[x10 <sup>2</sup> m]	[Pa]	[m/s]
3001	300	0	1,0	-280,90	2,61	5,67	-5,92	-888,93	41,21
3002	300	50	1,0	-308,21	2,62	5,35	-5,22	-630,67	36,71
3003	300	100	1,0	-301,26	2,57	4,63	-4,64	-644,58	37,57
3004	300	0	2,0	-277,93	2,99	5,68	-5,93	-873,14	41,05
3005	300	20	2,0	-298,06	2,99	5,80	-5,56	-577,59	36,16
3006	300	100	2,0	-300,86	2,86	4,58	-4,59	-633,58	37,28
3007	300	200	2,0	-295,00	2,56	3,90	-3,90	-721,15	39,36
3008	300	0	3,0	-277,11	3,18	5,68	-5,93	-871,71	41,01
3009	300	100	3,0	-300,46	3,01	4,53	-4,54	-640,34	37,43
3010	500	0	1,0	-265,50	2,64	3,24	-3,25	-661,77	41,12
3011	500	50	1,0	-202,91	2,63	7,86	-6,94	-587,92	43,35
3012	500	100	1,0	-265,97	2,66	7,49	-6,63	-702,28	41,77
3013	500	200	1,0	-260,26	2,62	5,69	-5,69	-771,61	43,29
3014	500	300	1,0	-250,99	2,66	4,95	-4,96	-882,91	45,63
3015	500	0	2,0	-204,83	3,05	8,15	-8,50	-643,18	42,15
3016	500	20	2,0	-217,89	3,09	8,04	-8,39	-635,54	37,92
3017	500	50	2,0	-241,52	3,13	78,84	-6,70	-632,49	41,85
3018	500	100	2,0	-239,44	3,18	7,52	-6,44	-648,43	42,24
3019	500	200	2,0	-235,75	3,06	5,70	-5,70	-722,03	43,83
3020	500	300	2,0	-263,58	2,81	5,06	-5,07	-907,30	43,53
3021	500	300	1,0	-206,78	2,91	5,02	-5,03	-813,96	46,22
3022	700	0	1,0	-133,60	2,04	10,21	-10,60	-1301,18	49,08
3023	700	300	1,0	-255,44	2,58	6,48	-6,56	-924,00	43,47
3024	700	500	1,0	-229,45	2,46	5,53	-5,56	-723,14	39,56
3025	700	0	2,0	-113,11	2,60	10,20	-10,61	-1234,37	48,76
3026	700	20	2,0	-126,55	2,68	10,11	-10,51	-1236,90	48,80
3027	700	100	2,0	-222,18	2,95	9,61	-7,90	-678,81	42,67
3028	700	300	2,0	-221,93	3,10	6,55	-6,66	-801,24	44,99

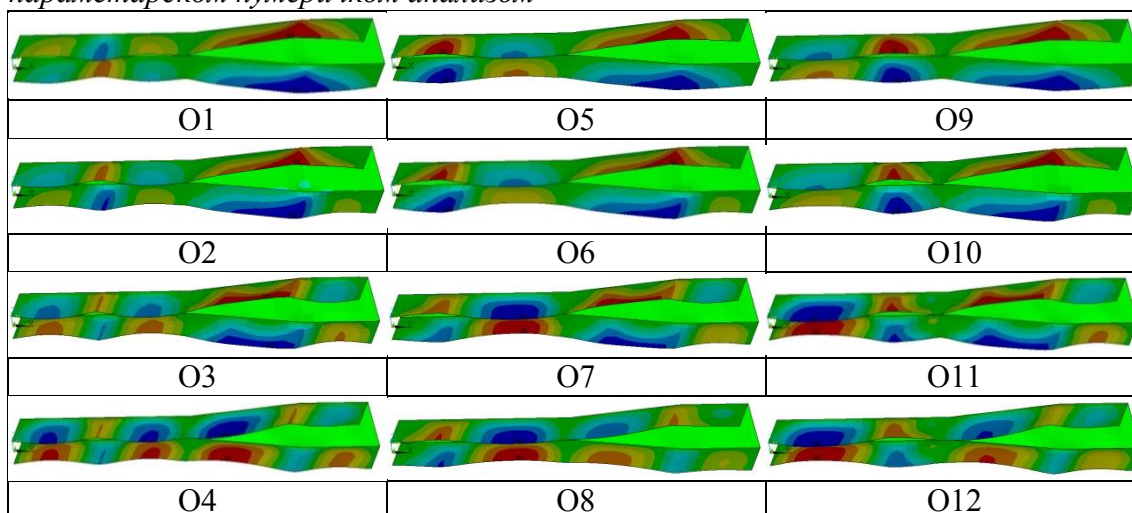
**Табела 5.3.5b** Резултати параметарских прорачуна за улазну брзину  $V_{ul} = 30m/s$

Ознака	$T_{un}$	$(T_{un} - T_{sp})$	$F_{gm}$	$(P_{ul} - P_{iz})$	$\sigma_{VMmax}$	$w^{+z}$	$w^{-z}$	$P_{st min}$	$V_{u max}$
[-]	[°C]	[°C]	[-]	[Pa]	[x10 <sup>8</sup> Pa]	[x10 <sup>2</sup> m]	[x10 <sup>2</sup> m]	[Pa]	[m/s]
3029	700	500	2,0	-276,94	2,58	5,52	-5,57	-719,62	38,97
3030	700	0	3,0	-225,60	3,01	10,19	-10,60	-762,30	40,78
3031	700	10	3,0	-224,61	2,91	10,25	-10,65	-772,50	40,95
3032	700	50	3,0	-230,82	3,20	9,93	-10,36	-716,83	40,14
3033	700	100	3,0	-241,80	3,30	9,61	-7,83	-714,97	40,02
3034	700	200	3,0	-248,12	3,35	7,11	-7,22	-765,86	40,95
3035	700	300	3,0	-194,00	3,38	6,55	-6,63	-832,00	47,44
3036	363	142	1,7	-243,17	2,87	4,91	-4,92	-629,18	41,08
3037	426	75	1,2	-253,65	2,77	6,84	-6,16	-642,99	40,68
3038	555	238	2,1	-233,09	3,13	5,85	-5,85	-738,63	43,63
3039	642	417	1,5	-155,50	2,67	5,65	-5,65	-957,03	52,60
3040	500	20	2,0	-221,54	3,09	8,04	-8,39	-604,98	40,93
3041	700	627	1,4	-233,35	2,62	5,20	-5,21	-914,27	46,28

3042	300	50	2,0	-254,94	2,96	5,37	-5,11	-545,24	39,54
3043	300	200	1,0	-268,94	2,43	3,94	-3,95	-708,49	42,27
3044	700	50	1,0	-248,37	2,66	9,84	-10,26	-721,89	42,59
3045	700	200	1,0	-244,88	2,53	7,35	-7,35	-831,71	44,41
3046	327	285	1,2	-267,96	2,45	3,79	-3,80	-683,00	42,00
3047	473	392	1,2	-251,77	2,49	4,62	-4,62	-817,28	44,72
3048	568	446	1,4	-231,51	2,52	5,11	-5,11	-897,77	45,93
3049	671	525	1,4	-218,55	2,55	5,47	-5,48	-967,64	47,30
3050	170	50	2,0	-307,91	2,49	3,24	-3,25	-583,45	36,12
3051	800	300	2,0	-232,79	3,01	7,27	-7,38	-844,32	42,74
3052	900	600	2,0	-203,90	2,74	6,40	-6,47	1110,40	48,06
3053	436	175	1,3	-269,98	2,76	5,30	-5,30	-705,23	41,80
3054	517	108	2,0	-240,51	3,18	7,64	-6,51	-630,55	41,48
3055	348	294	3,0	-181,04	2,56	3,86	-3,87	-604,16	42,27
3056	170	0	1,0	-288,61	2,49	4,02	-4,02	-544,75	38,34

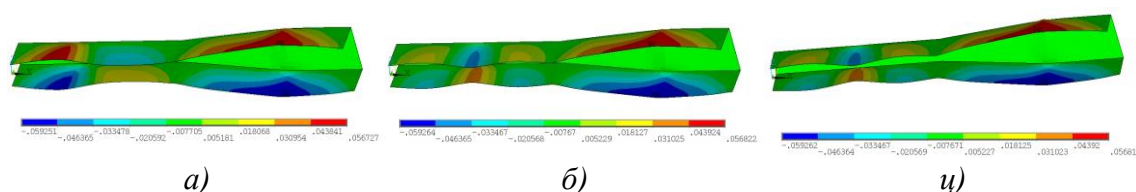
Облици испупчавања хоризонталних плоча секције 1 (2,1) и (3,1) се јављају како при нижим тако и при вишим вредностима  $T_{un}$  и зависе од вредности  $T_{un}$  и ( $T_{un}-T_{sp}$ ) преко утицаја "вертикалне" плоче секције 1.

**Табела 5.3.6** Основни облици деформисања канала добијени спрегнутом параметарском нумеричком анализом



У табели 5.3.7 су приказани нумерички параметри случајева који ће бити анализирани у даљем делу овог поглавља. Са ЗБК је обележен задати број корака уноса оптерећења, уз омогућавање софтверу да сам бира величину сваког од корака и подкорака сходно својој логици о брзини испуњености услова конвергенције у претходном подкораку. Са НК је означен остварени број корака

кроз који је унето оптерећење, НПК – број подкорака у сваком од корака, НИ – укупан број итерација до постизања решења. Ознака оствареног облика је сагласна са ознакама датим у табели 5.3.6. Деформисани модел канала у случају 3001 са  $T_{un} = 300^{\circ}\text{C}$  и  $(T_{un} - T_{sp}) = 0^{\circ}\text{C}$  и  $V_{ul} = 30\text{m/s}$  заузима облик О1. При  $T_{un} = 500^{\circ}\text{C}$  и  $(T_{un} - T_{sp}) = 0^{\circ}\text{C}$ , случај 3010, модел заузима облик О5, а за  $T_{un} = 700^{\circ}\text{C}$  и  $(T_{un} - T_{sp}) = 0^{\circ}\text{C}$ , случај 3025, модел поново заузима облик О1.



**Слика 5.3.1** Облици деформисања канала при  $T_{un} = 300^{\circ}\text{C}$  и  $(T_{un} - T_{sp}) = 0^{\circ}\text{C}$ :  
 а)  $V_{ul} = 10\text{m/s}$ , случај 1019, б)  $V_{ul} = 20\text{m/s}$ , случај 2005 и ц)  $V_{ul} = 30\text{m/s}$ , случај 3004

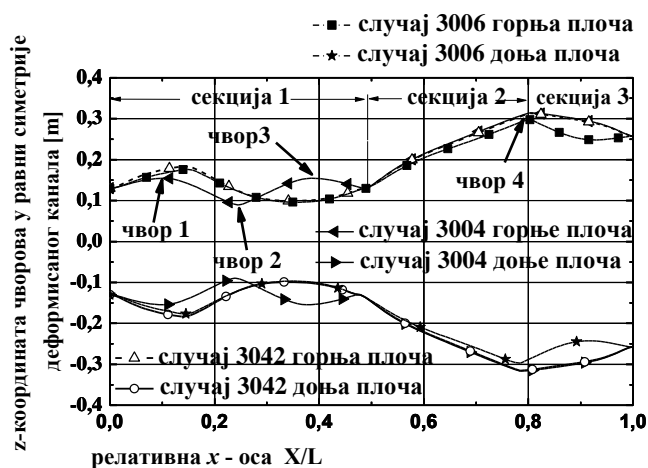
Међутим, број корака уноса оптерећења НК = 56 за случај 3025 у односу на НК = 60 за случај 3010 као и преко два пута мањи број НИ потврђују закључке дате у т.5.2 да број НК и НИ утиче на форму у коју ће се модел деформисати. Након НК = 25 и НИ < 5500 прорачуни 3001, 3004 и 3008 су исконвергирали до истоветног решења облика О1, али је прорачуном означеним са 3004\*,  $F_{gm}^S = F_{gm}^F = 2$  и НК = 105 добијен облик О5. Прорачун 1012 са  $F_{gm} = 2$  је након НК = 70 и НИ = 17010 ушао у конвергенцију осцилаторног карактера (Прилог) остваривши облик О9 сасвим другачији од облика О5 који је остварио прорачун 1011 са идентичним термичким оптерећењем и  $F_{gm} = 2$  и НИ = 13190.

**Табела 5.3.7** Карактеристике неколико нумеричких модела

случај	облик	$F_{gm}^S$	$F_{gm}^F$	ЗБК	НК	НПК	НИ
3001	О1	1	2	100	25	11	3051
3004	О1	2	2	100	25	11	3434
3008	О1	3	2	100	25	11	5319
3010	О5	1	1	100	60	14	12017
3025	О1	2	2	100	56	14	5345
3004*	О5	2	2	180	105	14	18967
3028	О7	2	2	200	119	14	18786
3035	О11	3	2	120	67	14	6179
1011	О5	1	1	100	66	14	13119
1012	О9	2	2	100	70	14	17010



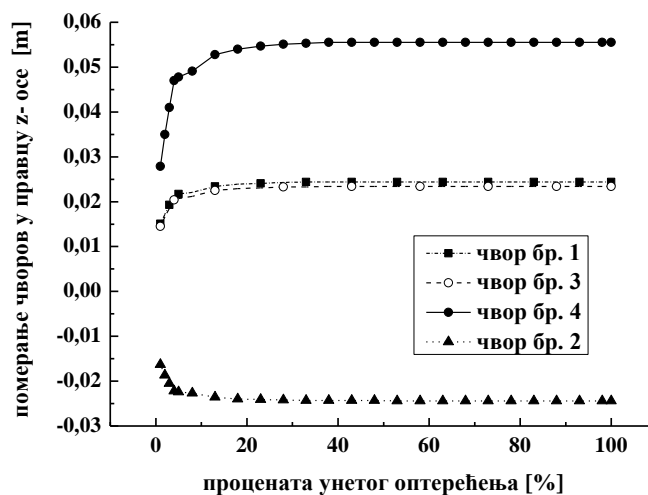
У случају 3035 са  $F_{gm}^S = 3$  и  $F_{gm}^F = 2$  остварен је облик О11, сасвим другачији од облика који је добијен прорачуном 3028 са  $F_{gm}^S = F_{gm}^F = 2$ . При  $(T_{un} - T_{sp}) = 0$  обе "хорионталне" плоче секције 3 се испупчавају у спољашњу страну канала, "вођене" ширењем пресека споја секција 2 и 3 (облици О1, О5 и О9). При нижим вредностима  $(T_{un} - T_{sp}) > 0$ , долази до испупчавања прво доњих (облици О2, О6 и О10), а при вишим вредностима и горњих "хоризонталних" плоча секције 3 (облици О3, О4, О7, О8, О11 и О12) ка унутрашњости канала услед стварања момента савијања довољног интензитета да "савлада" утицај ширења пресека споја секција 2 и 3. За вредност  $(T_{un} - T_{sp}) = 0$ , канал правоугаоног попречног пресека се деформише у облик који зависи од вредности температуре и брзине струјања. При постојању термичког оптерећења таквог да је  $(T_{un} - T_{sp}) > 0$ , генеришу се momenti савијања [17] који доводе до тога да се канал деформише у форму другачијег облика. Тако се хоризонталне плоче секције 1 при  $T_{un} = 700^\circ\text{C}$  и  $(T_{un} - T_{sp}) = 0^\circ\text{C}$  деформишу у форму са 3 полуталаса (случај 3022 и 3025), док се при  $(T_{un} - T_{sp}) = 100^\circ\text{C}$  и  $300^\circ\text{C}$  (случај 3028 и 3029) заузимају форму са два полуталаса. При  $(T_{un} - T_{sp}) = 500^\circ\text{C}$  (случај 3029) хоризонталне плоче секције 1 поново заузимају форму са 3 полуталаса.



Слика 5.3.2 Померања чворова у равни симетрије канала са истом задатом  $T_{un} = 300^\circ\text{C}$  и различитим вредностима  $(T_{un} - T_{sp})$

При томе се хоризонталне плоче секције 1 при повећању вредности  $(T_{un} - T_{sp})$  савијају у страну топлије површине, тј. ка унутрашњости канала, при нижим

вредностима само доња плоча (модел 3027) а при вишим вредностима ( $T_{un} - T_{sp}$ ) и горња (случај 3028), која је по површини мања од доње плоче те стога и крућа на савијање. Сличан закључак се може извести посматрајући резултате прорачуна за нумеричке моделе канала где је за  $T_{un} = 300^{\circ}\text{C}$  разлика температура унутрашње и спољашње површине плоче ( $T_{un} - T_{sp}$ ) =  $0^{\circ}\text{C}$  (случај 3001),  $20^{\circ}\text{C}$  (случај 3005) и  $100^{\circ}\text{C}$  (случај 3003). Добијени резултати су приказани на сл. 5.3.2. Хоризонталне плоче се савијају без нагле промене равнотежног положаја. То се може видети и на слици 5.3.3 која приказује зависности померања чворова структуралне нумеричке мреже модела број 3001 од нивоа унетог оптерећења у модел током поступка прорачуна. Чворови се налазе у равни симетрије модела чији деформисани облик је приказан на слици 5.3.3 са обележеним положајима посматраних чворова. Из облика приказаних кривих померање-оптерећење се види да при оптерећивању плоче не долази до извијања услед губитка стабилности. Криве су облика карактеристичног за понашање геометријски неидеалних плоча.



*Слика 5.3.3 Криве померања изабраних чворова у равни симетрије нумеричког модела број 3001 у односу на ниво унетог оптерећења. Положаји чворова у структури означени на слици 5.3.2*

У табели 5.3.8 су приказане максималне и минималне вредности прорачунатих величина из сета добијених резултата приказаних у табелама 5.3.1 – 5.3.5. Видимо да, у зависности од термичког оптерећења) тачке структуре остварују значајна

померања (око 10cm за случај 3025 са  $T_{un} = 700^{\circ}\text{C}$  и  $(T_{un} - T_{sp}) = 0^{\circ}\text{C}$ ) и та померања остварују чворови који се налазе упресеку на споју секција 2 и 3 као последицу ширења целог пресека. Максималну вредност  $V_{u \max} = 52,6\text{m/s}$  остварена је у случају 3039 са  $T_{un} = 642^{\circ}\text{C}$  и  $(T_{un} - T_{sp}) = 417^{\circ}\text{C}$ , што је повећање од 75% у односу на просечну вредност  $V_{ul} = 30 \text{ m/s}$ . Информације о  $V_{u \max}$ , заједно са информацијама о положају и величини зоне са највећим брзинама, као и положају вртложних зона, су од значаја за радне услове плазматрона и квалитет плазма хемијске припреме аеросмеше.

**Табела 5.3.8** Екстремне вредности прорачунатих величина из сета резултата приказаних у табелама 5.3.1 – 5.3.5

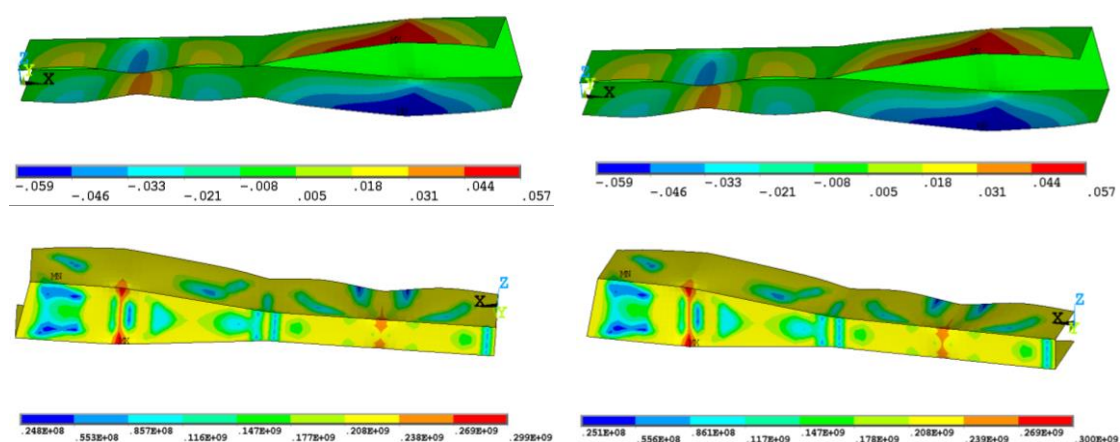
	$P_{ul} - P_{iz}$ [Pa]	$\sigma_{VM}$ [ $\times 10^8$ Pa]	$w^{+z}$ [m]	$w^{-z}$ [m]	$P_{st}$ [Pa]	$V_{u \max}$ [m/s]
max	-8,0	3,38	0,103	0,046	56,8	52,6
min	-308,2	2,04	0,027	-0,107	-1301,2	11,8

Максимална вредност  $\sigma_{VM} = 3,38 \times 10^8$  Pa добијена је у случају 3035 са  $T_{un} = 700^{\circ}\text{C}$  и  $(T_{un} - T_{sp}) = 300^{\circ}\text{C}$ , што је значајно изнад границе еластичности за ову температуру. Вредност и положај зона са максималним вредностима *Von Mises*-ових напона од значаја је за анализу радног века горионичког канала. Као и у претходним поглављима, зоне са великим вредностима се појављују у области око укљештења плоча.

#### *Избор модела нелинеарности материјала*

Модел материјала MM1 је примењив за случај малих деформација материјала који подлеже *Von Mises*-овом услову течења, што је случај са већином метала [61], али није адекватан за случајеве где се појављују велике деформације [48]. Модел материјала MM2 је заснован на претпоставци коришћења пластичног рада на одређивање параметара ојачања материјала који подлеже *Von Mises*-овом услову течења и прикладнији је за случајеве са великим деформацијама [48]. Унапред није могуће знати напонско-деформационо стање структуралног модела под задатим сетом спољњег оптерећења. Адекватно моделирање понашања

материјала захтева и поседовање већег броја експерименталних података него што је било доступно, посебно при дефинисању услова течења и понашања материјала након границе еластичности. На слици 5.3.4 су упоредно приказани прорачуни добијени за случај модела означеног са 2005 применом два различита модела материјала дефинисаних у т. 4.1.4. Видимо да расподеле вредности  $w$  и  $\sigma_{VM}$  изгледају идентично у оба случаја. Постоји веома мала разлика у прорачунатим екстремним вредностима за  $\sigma_{VM}$ . Вредности min/max за случај са MM1 су  $0,248 \times 10^8 / 0,299 \times 10^9$  Pa, а за случај MM2 су  $0,251 \times 10^8 / 0,300 \times 10^9$  Pa.



*Слика 5.3.4 Резултати нумеричких прорачуна за случај 2005 са моделом MM1 (лево) и моделом MM2 (десно); у првој врсти је приказана расподеле померања  $w$  [m/s], а у другој вредности  $\sigma_{VM}$  [Pa]*

Прорачун са MM2 је исконвергирао након укупно спроведених БИ = 23181 итерација, при БК = 117, ЗБК = 200 и задатим БПК = 14 подкорака у сваком од корака уноса оптерећења. Прорачун са MM1, означен као 2005, је исконвергирао након укупно спроведених БИ = 23195 итерација, при БК = 117, ЗБК = 200 и задатим БПК = 14, дакле са скоро идентичним параметрима као и претходни прорачун.

#### *Утицај избора модела преноса оптерећења*

Примена модела преноса оптерећења MP1 са очувањем профила расподеле величине која се преноси кроз површину раздвајања различитих нумеричких

домена је мање осетљива на разлику у густинама њихових нумеричких мрежа (случајеви 3001 са  $F_{gm}^S = F_{gm}^F = 1$ , 3001(1-2) са  $F_{gm}^S = 1, F_{gm}^F = 2$  и 3001(2-1) са  $F_{gm}^S = 2, F_{gm}^F = 1$ ), чак и при мањим вредностима  $F_{gm}$ .

У случају када је фактор густине структуралне нумеричке мреже  $F_{gm}^S$  мањи од фактора густине нумеричке мреже струјног домена  $F_{gm}^F$ , примена конзервативног модела MP2 доводи до веома нестабилног прорачуна, поготово у првом делу када се врши пренос почетног притисног оптерећења развијене струје на структуру (случај 3001E са  $F_{gm}^S = 1, F_{gm}^F = 2$ , у односу на 3001 са  $F_{gm}^F = F_{gm}^F = 1$ ). Нестабилност у преносу притисног оптерећења се у мањој мери наставља током целог прорачуна, за све три компоненте притисног оптерећења. У наведеном случају је поље померања са структуралног на струјни домен пренет коришћењем модела MP1 са очувањем профила расподеле величине која се преноси.

Када је  $F_{gm}^S > F_{gm}^F$ , при првом преносу притисног оптерећења са струјног на структурални домен, долази до велике дисторзије коначних елемената којима је дискретизован структурални домен (случај 3001(2-1)E са  $F_{gm}^S = 2, F_{gm}^F = 1$  у односу на 3001E са  $F_{gm}^S = 1, F_{gm}^F = 2$ ) што доводи до потребе уситњавања временског корака уноса оптерећења (са неизвесним исходом јер су прорачуни са 100, 300 и 1000 временских корака колапсирани не конвергирајући у првој итерацији преноса оптерећења) или повећања густина мрежа, тј. времена прорачуна.

При постојању различитих густина нумеричких мрежа структуре и флуида, што у нашем случају геометријске поставке проблема значи да бочне странице коначног елемента и коначне запремине који леже на површини раздвајања ова два нумеричка домена нису једнаке, тј. не поклапају се, избор механизма преноса утицаја са једног на други домен постаје од значаја. У нашем случају доводи до тога да се канал деформише у форму другачијег облика. Тако се канал при  $T_{un} = 700^\circ\text{C}$  и  $T_{un} - T_{sp} = 0^\circ\text{C}$ , са  $F_{gm}^F = 2$  за домен флуида и фактором мреже  $F_{gm}^S = 1$  или 2 за домен структуре (модел 3022 и 3025), деформише у зони 1 у форму са 3 полуталаса. Са друге стране (модел 3030), за који је  $F_{gm}^F = 2$  за домен флуида и

$F_{gm}^S = 1$  за домен структуре, заузима облик са два полуталаса у плочама које се налазе у секцији 1.

*Утицај дискретизације временског и квази – временског домена на резултат*

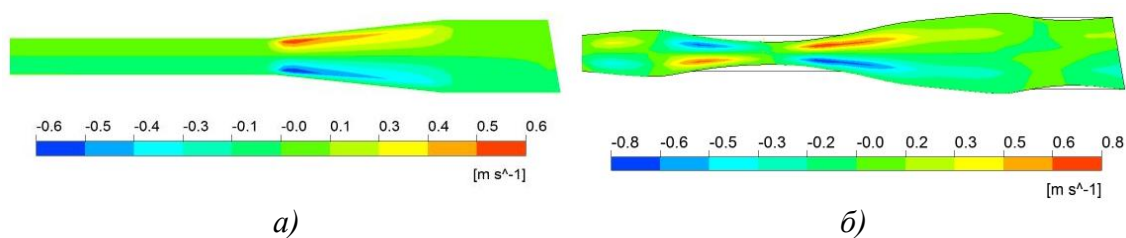
Постаља се питање како извршити оптимални избор временског и корака уноса оптерећења и какав је утицај тих параметара на конвергенцију. Временски корак квази-стационарног нумеричког прорачуна струјног поља и квази-временски корак (корак уноса оптерећења) статичке нелинеарне структуралне анализе морају бити довољно мали да би се остварили услови конвергенције, како у сваком од прорачуна понаособ, тако и глобални услови конвергенције, али ни превише мали да се дужина укупног прорачуна не би беспотребно повећавала. Дискретизација временског и квази-временског домена је дефинисана за сваки од прорачуна понаособ на основу пробе и карактеристика конвергенције до тада обављених прорачуна. Вредност се кретала од 100 до 1000. Пример где је конвергенција сваког од нумеричких прорачуна остварена и прорачун завршен конвергенцијом у последњем кораку уноса оптерећења илуструје случај 2501. Прорачун је испунио услове конвергенције али није у даљим итеративним циклусима успео да смањи ниво грешке, уз осцилаторни карактер глобале конвергенције са малим амплитудама.

Резултати изнети у претходним поглављима потврђују оправданост избора нумеричке шеме двосмерног секвенцијалног (чврстог) спрезања нелинеарног статичког и нестационарног прорачуна струјања флуида за примену у решавању проблема интеракције термички оптерећеног канала РГ и струје ваздуха кроз канал. Статичка анализа са тренутним равотежним стањем оптерећења на површи додира флуида и структуре је физички смислена. Нестационарна анализа зависи од претходног временског тренутка (резултата интеграције дискретизоваих једначина у претходном временском кораку), односно од претходне историје начина и нивоа уноса, као и од начина преноса оптерећења и интеграционе шеме. Стога је за тачну процену тренутног равнотежног стања у времену потребно тачно

решити равнотежна стања у свим претходним тренуцима од почетка уноса оптерећења, што је веома тешко изводљиво и прорачунски захтевно и дуготрајно.

#### 5.4 Утицај деформисања канала на параметре струјања

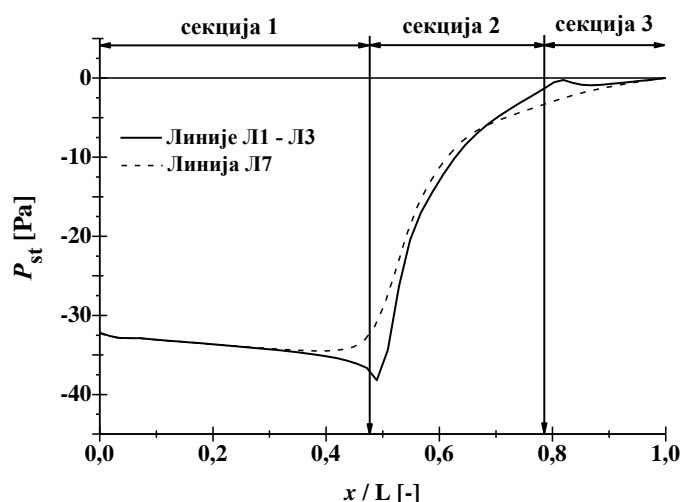
Успостављено струјно поље у деформисаном каналу сасвим је другачије од струјног поља кроз недеформисани канал. Утицај на струјно поље кроз деформисани канал може се видети на слици 5.4.1 где је приказана расподела компоненте брзине  $w$  у равни симетрије недеформисаног канала и деформисаног канала за случај 1004 са  $V_{ul} = 10 \text{ m/s}$ ,  $T_{un} = 494^\circ\text{C}$ ,  $(T_{un} - T_{sp}) = 362^\circ\text{C}$ .



**Слика 5.4.1** Расподела брзина  $w$  у равни симетрије а) недеформисани канал при  $V_{ul} = 10 \text{ m/s}$ , б) деформисани канал за нумерички случај 1004

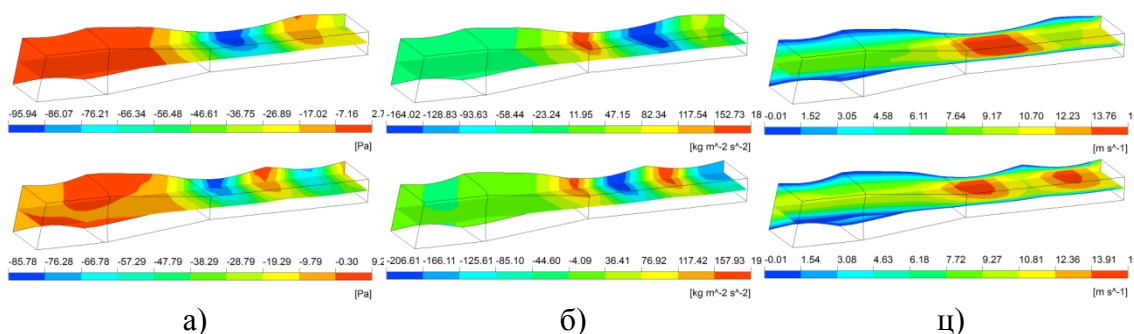
У зависности од нивоа термичког оптерећења канал се деформише у различите облике. На слици 5.4.2 је приказана расподела  $P_{st}$  на линијама Л1-Л3 и Л7 недеформисаног канала при потпуно развијеној струји  $V_{ul} = 10 \text{ m/s}$ . Након уласка у канал, струја прво благо убрзава ( $P_{st}$  опада) услед стварања централног језгра, а након изласка из секције 1 нагло успорава ( $P_{st}$  расте) услед повећања пресека секције 2, да би кроз секцију 3 прошла скоро непромењеном брзином. Облик расподеле  $P_{st}$  на линијама Л1-Л3 (горња плоче) и Л7 (бочне плоче) је скоро идентичан. Расподеле  $P_{st}$  при осталим вредностима  $V_{ul}$  су скоро идентичне приказаној са другачијим вредностима, сходно табели 4.2.1. У табели 5.4.1 су приказане расподеле статичког притиска  $P_{st}$ , градијента статичког притиска  $\partial P_{st} / \partial x$  у правцу  $x$ -осе и компоненте брзине  $u$  за случајеве 1004 (прва врста) са  $V_{ul} = 10 \text{ m/s}$ ,  $T_{un} = 494^\circ\text{C}$ ,  $(T_{un} - T_{sp}) = 362^\circ\text{C}$ , чије се хоризонталне плоче секције 1

деформишу у облик са два полуталаса и случаја 1010 (друга врста) са  $V_{ul} = 10 \text{ m/s}$ ,  $T_{un} = 700^\circ\text{C}$ ,  $(T_{un} - T_{sp}) = 400^\circ\text{C}$ , где се плоче деформишу у облик са три полуталаса. На сликама су истовремено приказане расподеле наведених величина у равни симетрије канала (вертикални приказ) и у равни  $x$ - $y$  (хоризонтални приказ). Видимо да је расподела  $P_{st}$  кроз деформисани канал сасвим другачија од расподеле кроз недеформисани канал и да веома зависи од облика у који се канал деформише.



Слика 5.4.2 Расподела  $P_{st}$  на линијама Л1-Л3 и Л7 недеформисаног канала при  $V_{ul} = 10 \text{ m/s}$

У табели 4.2.1 су приказане минималне, максималне и вредности статичког притиска усредњене по површини горње "хоризонталне" плоче секције 1 за различите вредности  $V_{ul}$ , за случај струјања кроз недеформисани канал.



Слика 5.4.3 Расподела а) статичког притиска  $P_{st}$ , б) градијента статичког притиска  $dP_{st}/dx$  и ц) компоненте брзине  $u$ , за случај 1004 (прва врста) и случај 1010 (друга врста)



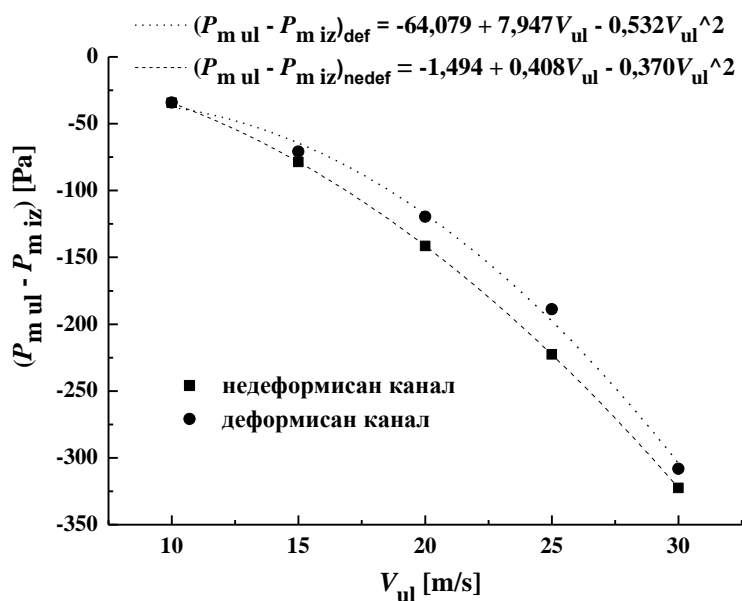
Аналогни резултати потпуно спрегнутог FSI прорачуна за различите вредности  $T_{un}$ ,  $(T_{un} - T_{sp})$  приказани су у табели 5.4.1. Видимо да услед испупчавања термички оптерећене плоче локалне вредности  $P_{st}$  постају блиске вредности гравитационог оптерећења  $\rho gh \cdot dA = 765 \text{ Pa}$  посматраног као расподељено оптерећење у средњој површи "хоризонталне" плоче. За нас је од интереса величина пада притиска кроз деформисани канал. Рад статичког притиска низ канал израчунат је као разлика статичких притисака на улазу и излазу из канала, при чему је статички притисак у посматраном пресеку одређен као усредњен према  $P_m = \Sigma(mP)/\Sigma m$ , где је  $P$  статички притисак а  $m$  локални масени проток кроз коначну запремину. Сумирање се врши и односи на чвор коначне запремине која се налази на посматраној површини (улаз или излаз) за коју се врши усредњавање. Масени проток се добија сумирањем доприноса од суседних тачака интеграције [26].

**Табела 5.4.1** Минимална, максимална и вредност статичког притиска усредњеног по површини горње "хоризонталне" плоче секције 1

Случај	$V_{ul}$ [m/s]	$T_{un}$ [°C]	$(T_{un} - T_{sp})$ [°C]	$P_{st \max}$ [Pa]	$P_{st \min}$ [Pa]	$P_{st \text{ sr}}$ [Pa]
1019	10	300	0	-4	-58	-30
1020		500	20	-2	-72	-35
1510	15	300	100	-10	-142	-73
1506		500	350	-3	-208	-92
2005	20	300	0	-43	-358	-123
2011		500	300	-36	-283	-131
2511	25	300	250	-46	-421	-227
2506		550	500	23	-489	-203
3001	30	300	0	-128	-863	-319
3010		500	0	47	-642	-295

Добијени резултати су приказани на слици 5.4.4 за деформисани и недеформисани канал као минималне вредности подскупа ( $P_{m \text{ ul}} - P_{m \text{ iz}}$ ) који одговара одређеној вредности  $V_{ul}$ , тако да је прорачуната вредност пада притиска увек мања. Видимо да је пад притиска кроз термички деформисане канале мањи него кроз недеформисан канал. На слици 5.4.4 су приказане једначине кривих фитовања приказаних вредности, које се могу искористити за одређивање граничне вредности ( $P_{ul} - P_{iz}$ ) у горе наведеном смислу при некој другој вредности  $V_{ul}$ . Са

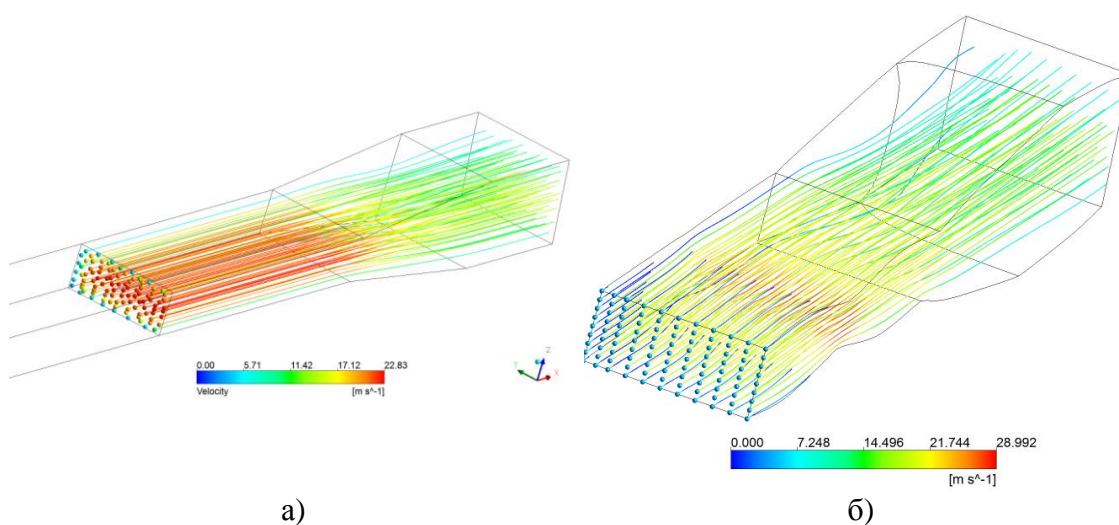
слике 5.4.3 видимо да је расподела  $P_{st}$  у струји кроз термички деформисани канал веома неравномерна, а струја при кретању кроз секцију 1 пролази кроз зоне у којима наизменично успорава и убрзава, па су стога путања флуидног делића и време које он проведе на тој путањи кроз деформисани канал различити од случаја недеформисаног канала.



Слика 5.4.4 Промена статичког притиска низ струју кроз недеформисан и деформисан канал

На слици 5.4.5 су приказане путање флуидних делића кроз канал за случај развијене струје  $V_{ul} = 20\text{m/s}$  кроз недеформисани канал и кроз канал чији је облик деформисања одеђен прорачуном означеном у табели 5.3.3 као случај 2005 са  $T_{un} = 300^\circ\text{C}$ ,  $(T_{un} - T_{sp}) = 0^\circ\text{C}$ . Пре уласка у канал, 99 флуидних делића је било равномерно распоређено по улазном пресеку. Бојом је приказана вредност компоненте брзине  $u$  коју флуидни делић постиже у посматраној коначној запремини. Слика 5.4.6 даје приказ путања и брзина делића из +у (горње слике) и -z правца (доње слике) за недеформисани канал (сл. 5.4.6а) и деформисани канал у случају 2005 (сл. 5.4.6б). Видимо да осим деформација плоча у првој секцији канала, деформација бочних плоча секција 2 и 3 значајно утичу на струју у секцији 3, потискујући је (у овом случају) ка средини канала. На слици 5.4.7 су приказане расподеле вредности брзина флуидних делића низ канал при  $V_{ul} =$

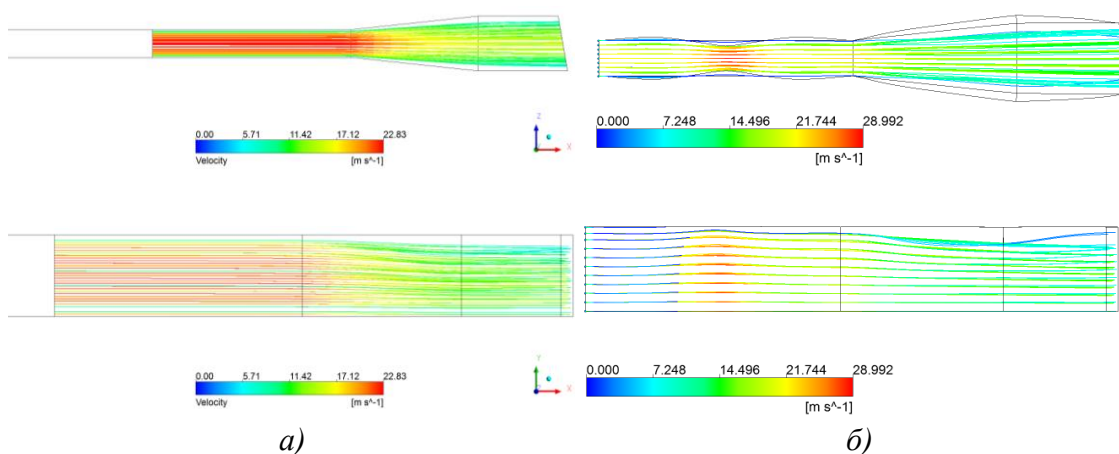
20m/s кроз недеформисани и деформисани канала за случај бр. 2005. На основу координата чворова мреже коначних запремина које су успостављене у струјном домену термички недеформисаног и деформисаног канала након завршетка нумеричког МКЗ прорачуна, одређене су димензије елемената коначне запремине у  $x$ -правцу кроз које пролази сваки од 99 посматраних флуидних делића при свом кретању од улазног до излазног пресека.



**Слика 5.4.5** Путање групе флуидних делића кроз канал  $V_{ul} = 20\text{m/s}$ , а) недеформисани, б) деформисани, случај 2005

На основу димензије посматраног елемента коначне запремине у  $x$ -правцу и вредности компоненте тренутне брзине у чвору елемента, одређено је приближно време задржавања флуидног делића у посматраном елементу. Сумирањем свих времена боравка у елементима коначних запремина који се налазе на путањи флуидног делића добијено је укупно време кретања флуидног делића кроз канал. Коришћењем апсолутних вредности компоненте брзине  $u$  превазиђен је проблем евентуалног кретања флуидног делића у повратном смеру. У табели 5.4.2 су приказане максималне, минималне и вредности времена кретања флуидног делића кроз канал усредњене за цео посматрани скуп флуидних делића, за струјање са  $V_{ul} = 20\text{m/s}$  кроз недеформисани и деформисани канал у нумерички случај 2005, као и број флуидних делића из почетног скупа од 99 делића који су прешли цео пут од улаза до излаза и који формирају скуп над којим је вршено усредњавање. Видимо да је у случају деформисаног канала тај број делића значајно мањи (укупно 72)

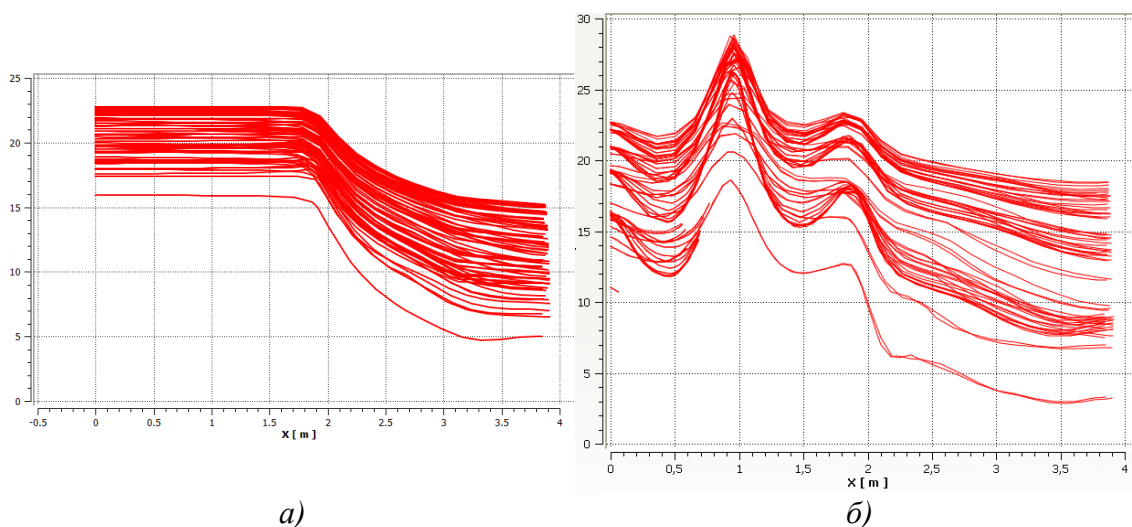
него у случају недеформисаног канала (укупно 84). Средња и минимална вредност времена задржавања у оба случаја су скоро идентична, око 0,25s и око 0,19s респективно, али су максималне вредности веома различите (0,63s у случају деформисаног у односу на 0,33s код недеформисаног канала).



**Слика 5.4.6** Путање групе флуидних делића кроз канал  $V_{ul} = 20\text{m/s}$  за: а) недеформисани, б) деформисани канал у случају 2005

У студији [6] је на основу гранулометријског састава угљеног праха, температурског нивоа и брзине аеросмеше (тј. честица) извршена процена масеног удела угљеног праха, чији ће испарљиви у потпуности сагорети на путу кроз деоницу канала аеросмеше за плазмахемијску припрему. При томе је у прорачуну брзине коришћена вредност дужине горионичког канала од  $L_{gk} = 4,25\text{m}$ . Утврђено је да се за типични гранулометријски састав угљеног праха и брзину  $V_{ul} = 15\text{ m/s}$ , односно време боравка честице у каналу аеросмеше  $\Delta t_{bc} = 0,28\text{s}$  и услов  $T = 800^\circ\text{C}$ , остварује потпуно сагоревање испарљивих честица до  $145\ \mu\text{m}$ , односно масено приближно 40% честица. При брзини од  $20\text{ m/s}$ , односно  $\Delta t_{bc} = 0,21\text{s}$  утврђено је да ће се остварити потпуно сагоревање испарљивих свих честица испод  $120\ \mu\text{m}$ , односно масено приближно 32%. Један од основних закључака студије [6] је да је "у енергетском смислу нека прихватљива граница да за релативно кратко време боравка честица угљеног праха у секцији канала за плазмахемијску припрему при постизању сагоревања до 60% масе испарљивих угљеног праха постоје реални услови за остваривање одрживог процеса

гасификације и припреме угљеног праха, уз услов да је обезбеђено добро мешање дела аеросмеше захваћеног непосредним дејством плазмене струје са осталим деловима аеросмеше и при доброј термичкој изолацији дотичне секције канала аеросмеше, односно остваривања приближно адијабатских услова за одвијање процеса у каналу".



**Слика 5.4.7** Компонента брзине и флуидних делића на путањи низ струју са  $V_{ul} = 20\text{m/s}$  кроз: а) недеформисани, б) деформисани канал у случају 2005

Пошто на вредност масеног удела честица чије ће се потпуно сагоревање остварити осим гранулометријског састава и квалитета мешања са ваздухом утиче и време боравка честица у каналу, претпоставка је да ће новоформирана струјна слика кроз термички деформисани канал на одређени начин утицати на процес загревања честица, издвајања испарљивих и укупну ефикасност процеса плазма припреме аеросмеше.

**Табела 5.4.2** Максималне, минималне и усредњене вредности времена кретања флуидног делића кроз канал за струјање са  $V_{ul} = 20\text{m/s}$

	број флуидних делића	$t_{\max}$ [s]	$t_{\min}$ [s]	$t_{sr}$ [s]
недеформисани	84	0,33	0,20	0,24
случај 2005	72	0,63	0,18	0,25

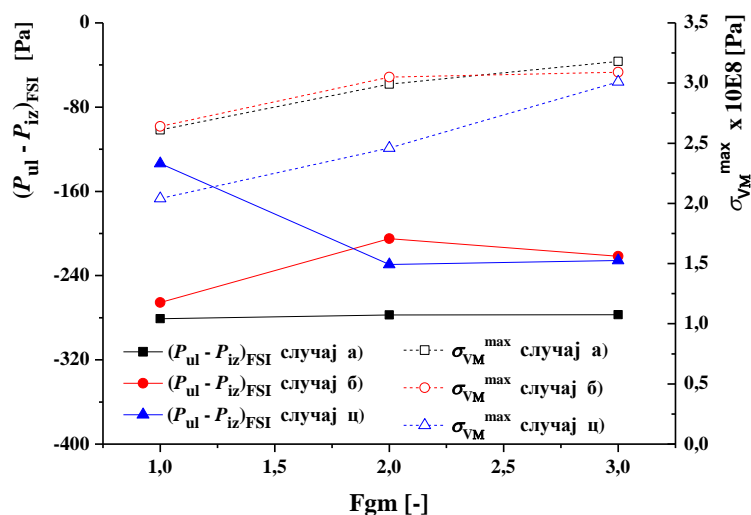
На путању честице утичу гравитација и аеродинамичке силе, зависне од величине а тиме и масе честице. Што је честица лакша и мањег пречника, то ће њена путања бити приближнија струјници. Сем на очекивано продужење времена боравка, резултати нумеричких прорачуна термички оптерећеног канала указују и да ће се честице у већој мери сударати са зидовима канала, при томе губити кинетичку енергију и падати ка дну канала. Овај закључак није тако директан и требало би посебно испитати утицај струјног поља кроз деформисани канал на путање честица различитих гранулација.

### 5.5 Анализа перформанси прорачуна

Постоји више урађених тест-случајева од стране развојног тима софтверског пакета ANSYS датих у [24], али и проблема решених од стране других аутора [80, 38, 78, 79] који су потврдили да коришћени коначни елементи (т. 4.1.1) испуњавају критеријум комплетности и који су доказали њихову примењивост у решавању различитих проблема термички оптерећених плоча и љуски. Добијени резултати су указали на приближне карактеристике линеарног и квадратног изопараметарског елемента, са благом предношћу на страни другог, али се због већег броја чворова и комплекснијих функција облика у том случају продужава време прорачуна. Друге студије [78, 79, 87] су потврдиле квалитет и примењивост квадратног изопараметарског елемента тип ET2 у решавању бифуркационе и нелинеарне анализе стабилности слободноослоњених плоча, тако да је он првенствено коришћен као дискретизациони коначни елемент у прорачунима.

У случају неколико нумеричких FSI модела формираних за различите вредности улазних параметара  $T_{un}$ ,  $(T_{un} - T_{sp})$  и  $F_{gm}$ , испитивана је зависност резултата добијених нумеричким FSI прорачуном од вредности фактора нумеричке мреже  $F_{gm}$ . Резултати добијени нумеричким FSI прорачуном за  $P_{ul} - P_{iz}$  и  $\sigma_{Vmax}$  приказани су на сл. 5.5.1. за три различита нумеричка случаја: а)  $T_{un} = 300^{\circ}C$ ,  $(T_{un} - T_{sp}) = 0^{\circ}C$ , б)  $T_{un} = 500^{\circ}C$ ,  $(T_{un} - T_{sp}) = 0^{\circ}C$ , ц)  $T_{un} = 300^{\circ}C$ ,  $(T_{un} - T_{sp}) = 0^{\circ}C$ . Видимо

да је задовољен услов конвергенције по излазној величини  $\sigma_{VMmax}$  и да је приближавање асимптотском решењу остварено преко нижих вредности промењиве са повећањем  $F_{gm}$ . Ово је било и очекивано обзиром да је структурални прорачун методом коначних елемената заснован на методи померања. Конвергенција нумеричког решења вредности разлике притисака ( $P_{ul} - P_{iz}$ ) нумеричким FSI прорачуном са повећањем  $F_{gm}$  није експлицитна за сваки од FSI модела. Са слике 5.5.1 видимо да је модел "а)" неосетљив на промену  $F_{gm}$ , у случају модела "ц)" имамо опадајућу конвергенцију, док у случају модела "б)" је потребно урадити додатне прорачуне и за  $F_{gm} > 3$ .



**Слика 5.5.1** Промена вредности  $\sigma_{VMmax}$  [ $\times 10^8$  Pa] и  $(P_{ul} - P_{iz})$  [Pa] добијених нумеричком FSI анализом у зависности од густине мреже

Само у случају модела означених са 1011 и 1012 са  $T_{un} = 170^\circ\text{C}$ ,  $(T_{un} - T_{sp}) = 0^\circ\text{C}$  и  $F_{gm} = 1$  и  $F_{gm} = 2$  респективно, је примећена промена облика са променом густине дискретизационе мреже. Нумерички прорачун 1012 је при томе показао изузетну нестабилност конвергенције. Нумерички параметри за ове моделе дати у табели 5.3.7 су веома слични тако да није јасно у овом тренутку шта је био узрок проблематичне конвергенције и шта је довело до тога да се остваре сасвим различити облици деформисања у ова два идентична случаја.

Из разлога стабилности, сигурнијег остваривања конвергентности и смањења времена прорачуна, као почетни услов у струјном домену је коришћен модел са

улазним профилем развијене струје на улазу у домен и развијено поље струјања кроз струјни домен недеформисаног канала. Међутим, ово није у сваком од случајева безусловно омогућило постизање конвергентног решења. Карактеристично за наведене неконвергентне случајеве је да је облик деформисања такав да је дошло до значајног смањења пресека канала (на око 70%), дакле до локалног, али и наглог (гледано у правцу струје) повећања брзине струјања. Са дијаграма конвергенције за случај под редним бр. 2004 (табела 5.3.3) се види да одмах након првог прорачунског циклуса успостављања струјног поља дефинисаног почетним условима, прорачун струјних параметара почиње да дивергира и не успева да поврати конвергентно понашање до прекид прорачуна. Истовремено, након првог скретања ка дивергентном понашању, структурални прорачун се брзо усталибује и задржава конвергентно понашање до тренутка прекида прорачуна. Глобална конвергенција FSI прорачуна прелази из конвергентног у осцилаторно конвергентно понашање са великим амплитудама. Коришћени су резултати струјања кроз продужени канал, али су могли бити коришћени и други гранични и почетни услови, као и експериментално утврђена расподела струјног поља. Након завршеног прорачуна, провераване су вредности максималних померања нумеричких мрежа оба домена у правцима све три осе. Утврђено је да је одступање (размицање или преклапање) граничних површина нумеричких мрежа било занемарљиво у свим случајевима који су исконвергирали. Провером осталих параметара квалитета нумеричких мрежа (искривљеност, ортогоналност, издуженост, однос дужина бочних ивица итд., дато у Прилогу) утврђено је да у резултатима приказани параметри добијени конвергентним нумеричким прорачунима испуњавају критеријуме који су потребни да обезбеде конвергентно решење са довољном тачношћу.

Једна од карактеристика за оцену тачности добијених резултата је и провера прорачунатих померања чворова нумеричких мрежа структуралног и струјног домена након завршеног прорачуна, без обзира да ли је прорачун завршен конвергентним уносом целокупног оптерећења или испуњавањем постављених услова конвергенције. У скоро сваком од нумеричких прорачуна разлика између



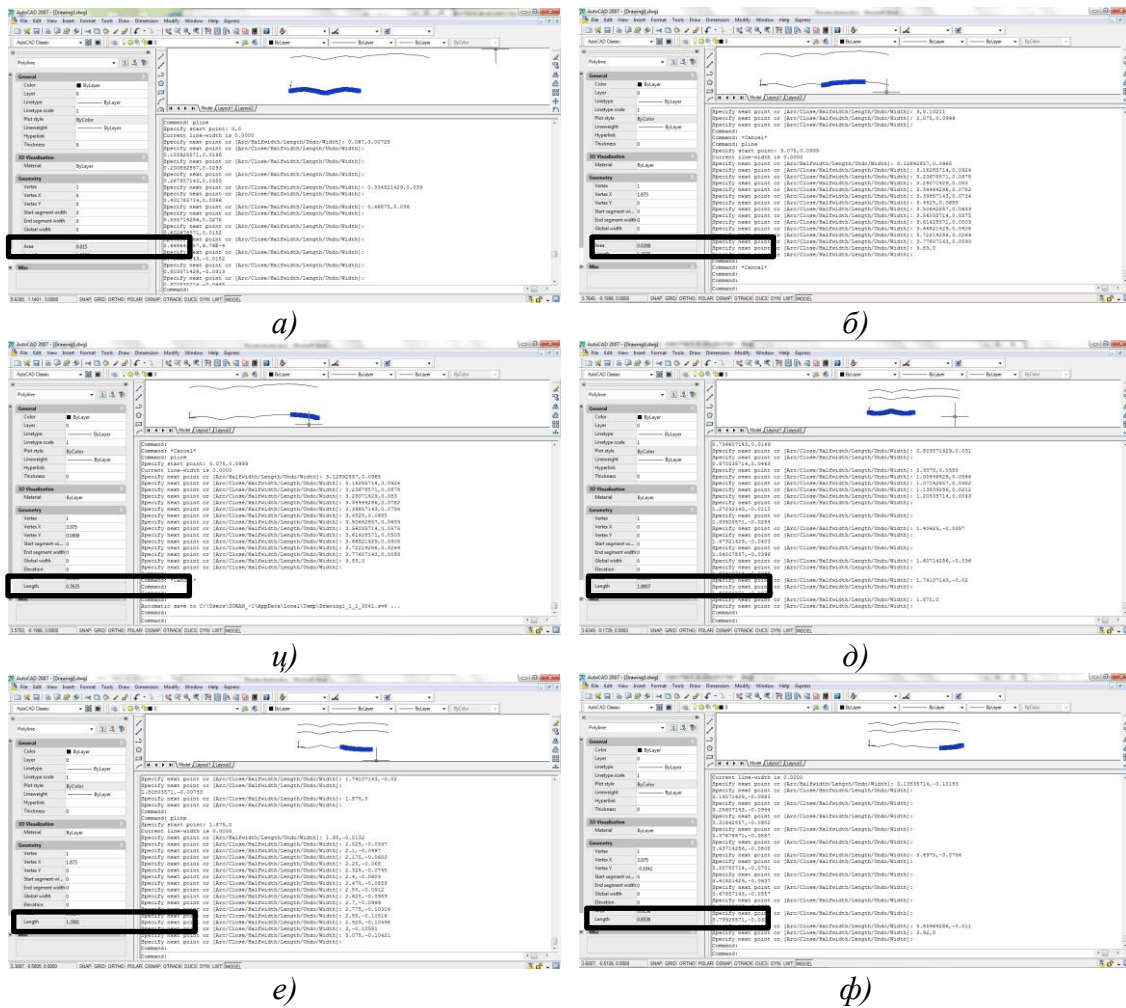
максимално оствареног померања нумеричке мреже структуралног и струјног домена била је реда  $10^{-6}m$ , тј. мање од  $h/1000$ , што се може сматрати за прихватљиво одступање. Међутим, у случају прорачуна редни бр. 3001 (табела 5.3.5a) та разлика је била значајно већа, скоро 1% дебљине  $h$ . Без обзира на то, није утицала на остваривање конвергенције прорачуна.

Пример непостизања услова конвергенције, како сваког од солвера посебно, тако и опште конвергенције, види се на примерима под редним бројевима 2004, 2008 и 2009 датим у Прилогу, када су после дужег времена прорачуна, услед дивергентног понашања прорачуни прекинути на захтев. Осим релативно лоше нумеричке мреже у овим случајевима ( $F_{gm} \approx 1,5$ ), додатни проблеми постизања конвергенције су били и неадекватно постављен почетни услов по струјном домену (т. 4.2) који је за те случајеве био поремећујући уместо фактор стабилизације прорачуна, као и недовољно фина дискретизација временског и квази-временског домена.

Један од начина провере тачности прорачуном добијених резултата је провера дужине пресека равни симетрије са деформисаним "хоризонталним" плочама свих секција канала. Обзиром да је канал симетричан у односу на вертикалну  $x$ - $z$  раван, тачке које се налазе на материјалној линији која лежи у пресеку равни  $x$ - $z$  и средње површи "хоризонталних" плоча се при термичком ширењу плоча померају само у равни  $x$ - $z$ . При томе, вредности напона  $\sigma_{VM}^{MID}$  који се у тим тачкама остварују при загревању структуре не прелазе границу еластичности материјала за задату температуру (поглавље 5.2.6). Кроз координате чворова деформисаног канала који леже у равни симетрије је применом софтверског пакета *AutoCad* провучена полилинија (свака два суседна чвора мреже који леже у равни  $x$ - $z$  су спојена правом линијом), чија се као једна од карактеристика објекта добија укупна дужина полилиније (*Properties -> Geometry -> Length*). На слици 5.5.2 је приказана провера прорачуна за случај бр. 3022 (табела 5.3.5a), са  $V_{ul} = 30m/s$ ,  $T_{un} = 700^{\circ}C$ ,  $T_{un} - T_{sp} = 0^{\circ}C$ ,  $F_{gm}^S = 1$ .

Дужина линије пресека недеформисане горње плоче секције 1 са равни симетрије  $L_1^g = 1,875m$ , њено термичко издужење је  $\Delta L_1^g = L_1^g \cdot \alpha \cdot \Delta T = 1,875 \cdot 19 \cdot 10^{-6} \cdot 700 =$

0,0249375m, па је укупна дужина деформисане линије  $L_1^g + \Delta l_1^g = 1,875 + 0,0249375 = 1,8999375m$ , што износи  $\sim 99,68\%$  од вредности  $Length = 1,9006m$  добијене у *AutoCad*-у (слика 5.5.2a) на основу резултата структуралног прорачуна, што чини разлику од 0,32%.



Слика 5.5.2 Провера тачности нумеричког прорачуна мерењем дужине пресека равни симетрије са деформисаним "хоризонталним" плочама свих секција канала применом софтверског пакета *AutoCad*.

Дужина линије пресека недеформисане горње плоче секције 2 са равни симетрије  $L_2^g = \sqrt{1,2^2 + 0,1275^2} = 1,206754m$ , издужење  $\Delta L_2^g = L_2^g \cdot \alpha \cdot \Delta T = 1,206754 \cdot 19 \cdot 10^{-6} \cdot 700 = 0,0160498m$ , а укупна дужина  $\Delta L_2^g + L_2^g = 1,222804m$ , што је  $\sim 101,26\%$  од вредности  $Length = 1,2076m$  добијене у *AutoCad*-у (слика 5.5.2б) на основу резултата структуралног прорачуна, са разликом од 1,26%.

Дужина недеформисане линије секције 3 је  $L_3^g = 0,755\text{m}$ , издужење  $\Delta L_3^g = L_3^g \cdot \alpha \cdot \Delta T = 0,755 \cdot 19 \cdot 10^{-6} \cdot 700 = 0,0100415\text{m}$ , а укупна дужина деформисане линије  $\Delta L_3^g + L_3^g = 0,7650415\text{m}$ , што износи  $\sim 100,20\%$  од вредности  $Length = 0,7635\text{m}$  добијене у *AutoCad*-у (слика 5.5.2ц) на основу резултата структуралног прорачуна, што чини разлику ова два прорачуна од  $0,20\%$ .

Истим поступком за доњу линију секције 1 добијамо:  $L_1^d = 1,875\text{m}$ ,  $\Delta L_1^d = L_1^d \cdot \alpha \cdot \Delta T = 1,875 \cdot 19 \cdot 10^{-6} \cdot 700 = 0,0249375\text{m}$ ,  $L_1^d + \Delta L_1^d = 1,875 + 0,0249375 = 1,8999375\text{m}$ , што је  $\sim 99,68\%$  од вредности  $Length = 1,9007\text{m}$  добијене у *AutoCad*-у (слика 5.5.2д) на основу резултата структуралног прорачуна, разлика  $0,32\%$ .

За доњу линију секције 2:  $L_2^d = \text{sqrt}(1,2^2 + 0,1275^2) = 1,206754\text{m}$ ,  $\Delta L_2^d = L_2^d \cdot \alpha \cdot \Delta T = 1,206754 \cdot 19 \cdot 10^{-6} \cdot 700 = 0,0160498\text{m}$ ,  $\Delta L_2^d + L_2^d = 1,222804\text{m} \sim 101,22\%$  од вредности  $Length = 1,2081\text{m}$  добијене у *AutoCad*-у (слика 5.5.2е) на основу резултата структуралног прорачуна, са разликом од  $1,22\%$ .

За доњу линију секције 3:  $L_3^d = 0,845\text{m}$ ,  $\Delta L_3^d = L_3^d \cdot \alpha \cdot \Delta T = 0,845 \cdot 19 \cdot 10^{-6} \cdot 700 = 0,0112385\text{m}$ ,  $\Delta L_3^d + L_3^d = 0,856239\text{m} \sim 100,29\%$  од вредности  $Length = 0,8538\text{m}$  добијене у *AutoCad*-у (слика 5.5.2ф) на основу резултата структуралног прорачуна, са релативном разликом од  $0,29\%$ .

## 6 Нумерички модели фази логике

### 6.1 Формирање модела фази логике

Фази логика (расплинута логика, енгл. *fuzzy logic*) представља проширење класичне логике у којој променљиве могу да имају само две вредности, тачно и нетачно, тј. 0 и 1, на могућност да промењива припада одређеној класи са неким степеном, односно на могућност моделирања исказа чија истинитосна вредност може припадати континуалном прелазу од тачног ка нетачном.

У општем случају, коначно решење нумеричког прорачуна коришћењем дискретизационих метода зависи од избора различитих улазних параметара [34] као што су тип коришћених дискретизационих елемената, величина елемената, топологија мреже, нумерација чворова итд. Стога један такав прорачун карактеришу значајне неодређености које се одражавају на резултате прорачуна па су овакви проблеми погодни за примену фази логике.

Примењена фази логика заснована је на логичкој релацији:

$$\text{ако } x \text{ јесте } A \text{ онда } y \text{ јесте } B \quad (6.1)$$

где су  $A$  и  $B$  лингвистичке вредности дефинисане фузи скуповима опсега  $X$  и  $Y$  респективно. Део "ако" правила " $x$  јесте  $A$ " се назива претходник или претпоставка, а део "онда" правила " $y$  јесте  $B$ " се назива последица или закључак.

Сваком скупу улазних фази података додељује се скуп излазних података коришћењем формираних правила и пондерисаног усредњавања методом центра тежишта:

$$y^* = \frac{\sum \mu_i \cdot Y_i}{\sum \mu_i} \quad (6.2)$$

У једначини (6.2)  $\mu_i$  су функције трансформације излазне величине  $Y_i$  на основу  $i$ -тог правила. У овом поглављу су описане карактеристике и начин формирања нумеричких модела базираних на фази логици, који су развијени у циљу предвиђања резултата нумеричке симулације интеракције флуид-структура (FSI) описаног проблема канала аеросмеше, добијених коришћењем спрегнутих нумеричких прорачуна динамике структуре (CSD) и прорачуна динамике флуида (CFD). Формирање, тестирање и спровођење прорачуна сваког од фази модела извршено је помоћу софтверског пакета MATLAB [58].

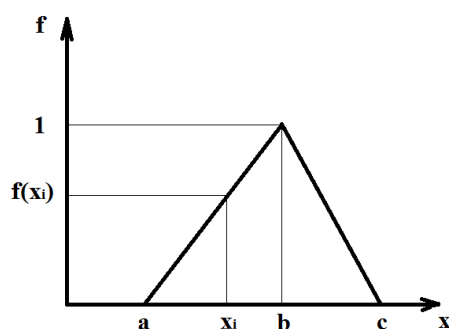
Параметри нумеричког FSI прорачуна су коришћени као улазне и излазне промењиве фази нумеричких модела. Као улазне промењиве коришћене су вредности којима је дефинисан параметарски FSI прорачун: задата температура унутрашњег зида канала  $T_{un}$ , задата разлика температура унутрашњег и спољашњег зида ( $T_{un} - T_{sp}$ ), коришћени фактор густине дискретизационе мреже коначних елемената  $F_{gm}^S$  и задата брзина струјања на улазу у канал  $V_{ul}$ . Као излазне величине коришћени су параметарским FSI прорачуном добијене вредности пада притиска низ канал ( $P_{ul} - P_{iz}$ ) и максимална вредност *Von Misses* – овог напона  $\sigma_{VMmax}$  у структури канала. Формирана су две групе фази модела, три модела *Mamdani* типа и три модела *Sugeno* типа.

Основна структура *Mamdani* фази модела се састоји у томе да се скуп улазних карактеристика преслика у улазне функције трансформације, улазне функције се затим комбинују у правила, правила затим у скуп излазних карактеристика, који се приказује у облику излазних функција, а овај скуп функција даје једнозначну вредност излазне величине. Структура правила која се формирају у току поступка развоја *Mamdani* фази модела је у основи предефинисан начином интерпретације карактеристика промењивих у моделу. Фази модели типа *Mamdani* означена су са M1, M2 и M3. Модел M1 је формиран на скупу улазних параметара 52 нумеричка FSI прорачуна, са излазним параметром ( $P_{ul} - P_{iz}$ ). Модел M2 је формиран на скупу улазних параметара 52 нумеричка FSI прорачуна и вредношћу  $\sigma_{VMmax}$  као излазном величином. Модел M3 је формиран на скупу улазних параметара 136 нумеричка FSI прорачуна и излазним параметром ( $P_{ul} - P_{iz}$ ). Серију од 52

прорачуна чији су параметри коришћени за формирање модела M1 и M2 чине нумерички FSI прорачуни за  $V_{ul} = 30$  m/s, док серију од 136 нумеричка FSI прорачуна чине прорачуни спроведени за разне вредности  $V_{ul} = 10, 15, 20, 25$  и 30m/s, приказаних у т. 5.3.1. Улазни фузи сет је пресликан [35] коришћењем нормализованих функција трансформације [38] троугаоног облика:

$$f(x_i) = \max\left(\min\left(\frac{x_i - a}{b - a}, \frac{c - x_i}{c - b}\right), 0\right) \quad (6.3)$$

које зависе од три скаларна параметра  $a$ ,  $b$  и  $c$ , слика 6.1.1.



*Слика 6.1.1* Функција трансформације троугаоног облика

Све нумеричке вредности улазних и излазних промењивих замењене су лингвистичким, при чему је за сваку од шест промењивих дефинисан посебан сет лингвистичких термина. За опис улазне промењиве температура унутрашњег зида канала  $T_{un}$  употребљен је фази сет са следећим терминима: VLT, LT, MT, HT и VHT. Улазна промењива разлика температура унутрашњег и спољашњег зида канала ( $T_{un} - T_{sp}$ ) описана је са десет лингвистичких термина: WdT, VLdT, LdT, MdT, HdT, VHdT, EdT, FdT, GdT и MdT. Улазна промењива фактор густине дискретизационе мреже  $F_{gm}$  описана је терминима LF, MF и HF. Улазна промењива брзина на улазу у канал  $V_{ul}$  описана је са пет термина: VLS, LS, MS, HS и VHS. Излазна промењива пад притиска низ канал ( $P_{ul} - P_{iz}$ ) је представљена са пет лингвистичких термина: VLP, LP, MP, HP и VHP. Излазна промењива максимална вредност *Von Misses* – овог напона у структури канала  $\sigma_{VMmax}$  описана је са терминима LWM, MWM и HWM.

На основу полазних параметара нумеричких FSI прорачуна и добијених резултата датих у т. 5.3.1, одређене су вредности скаларних параметара  $a$ ,  $b$  и  $c$  за све четири улазне и обе излазне промењиве. Добијене вредности скаларних параметара  $a$ ,  $b$  и  $c$  улазних величина модела M1 и M2 су приказане у табели 5.5.1, а излазних у табели 5.5.2.

**Табела 6.1.1** Вредности скаларних параметара  $a$ ,  $b$  и  $c$  функције  $f_i$  за улазне промењиве модела M1 и M2

улазне промењиве													
функција	$T_{un}$ [°C]			$(T_{un} - T_{sp})$ [°C]							$F_{gm}$ [-]		
	LT	MT	HT	WdT	VLdT	LdT	MdT	HdT	VHdT	EdT	LF	MF	HF
<b>a</b>	300	300	500	0	0	50	100	200	300	400	1	1	2
<b>b</b>	500	500	700	0	50	100	200	300	400	500	1	2	3
<b>c</b>	500	700	700	50	100	200	300	400	500	500	2	3	3

На основу одређених вредности скаларних параметара  $a$ ,  $b$  и  $c$  формиране су функције трансформације  $f_i$  за моделе M1 и M2 и њихови облици су приказани на слици 6.1.2

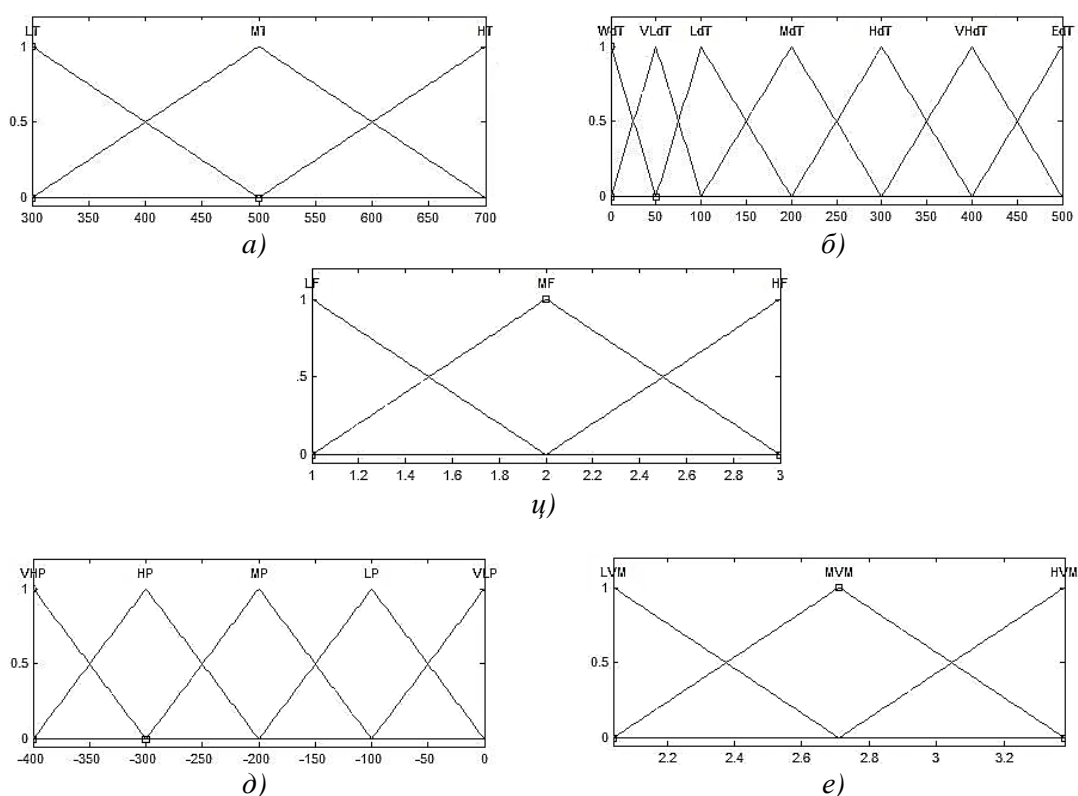
**Табела 6.1.2** Вредности скаларних параметара  $a$ ,  $b$  и  $c$  функције  $f_i$  за улазне промењиве модела M1 и M2

излазне промењиве								
функција	$(P_{ul} - P_{iz})$ [Pa]					$\sigma_{VMmax}$ [ $\times 10^8$ Pa]		
	VLP	LP	MP	HP	VHP	LVM	MMV	HVM
<b>a</b>	-100	-200	-300	-400	-400	2.04	2.04	2.71
<b>b</b>	0	-100	-200	-300	-400	2.04	2.71	3.38
<b>c</b>	0	0	-100	-200	-300	2.71	3.38	3.38

База знања је формирана од укупно 104 различитих правила за излазну величину  $(P_{ul} - P_{iz})$  и 52 правила за излазну величину  $\sigma_{VMmax}$ . Правила су формирана мануално коришењем модификације израза (6.1) у облику "ако  $X$  и ако  $Y$  онда  $Z$ ".

Тежински коефицијенти су добијени усредњавањем на основу карактеристика улазног сет података. Зависност излазне величине  $(P_{ul} - P_{iz})$  [Pa] од улазних величина  $T_{un}$  [°C] и  $(T_{un} - T_{sp})$  [°C] формираног модела M1 представљена је у облику површине завиосности на слици 6.1.3а, док је на слици 6.1.3б приказана зависност излазне величине модела M1 од улазних величина  $T_{un}$  [°C] и  $F_{gm}^S$  [-]. На

слици 6.1.3ц је приказана зависност излазне величине ( $P_{ul} - P_{iz}$ ) [Pa] од улазних величина ( $T_{un} - T_{sp}$ ) [°C] и  $F_{gm}^S$  [-] модела М1. Зависност излазне величине  $\sigma_{Vmax}$  [ $\times 10^8$  Pa] од улазних величина  $T_{un}$  [°C] и ( $T_{un} - T_{sp}$ ) [°C] формираног модела М1 представљена је у облику површине зависности на слици 6.1.3д.

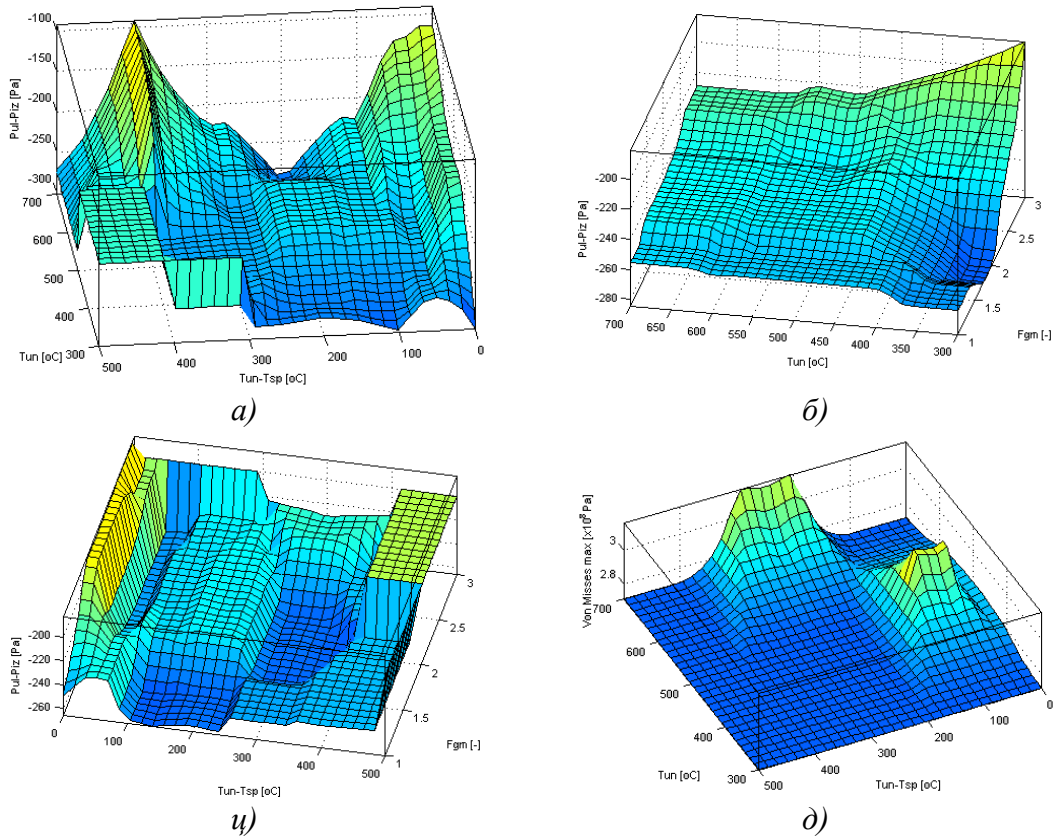


**Слика 6.1.2** Функције трансформације  $f_i$  за моделе М1 и М2: а) температура унутрашњег зида канала  $T_{un}$  [°C], б) разлика температура унутрашњег и спољашњег зида ( $T_{un} - T_{sp}$ ) [°C], ц) густина дискретизационе мреже  $F_{gm}^S$  [-], д) пад притиска низ канал ( $P_{ul} - P_{iz}$ ) [Pa] и е) максимална вредност Von Mises – овог напона  $\sigma_{Vmax}$  [ $\times 10^8$  Pa]

Зависности излазних од улазних величина су веома нелинеарне, а недовољно велики скуп улазних параметара и функција трансформације доводе до наглих, скоро скоковитих промена у вредностима излазних функција и постојањем равних површина (без промене) на површи зависности. Осим ове чињенице, облик површи зависности излазне величине  $\sigma_{Vmax}$  приказане на слици 6.1.3д је условљен и чињеницом да до појаве напона на граници еластичности долази при термичким оптерећењима која су значајно нижа од оних којима је



претпостављено да су изложени модели чија решења су коришћена за формирање фази модела.



**Слика 6.1.3** Површине зависност излазних од улазних величина: а) модел М1, улазне величине  $T_{un}$  и  $(T_{un} - T_{sp})$ , излазна  $(P_{ul} - P_{iz})$ , б) модел М1, улазне величине  $T_{un}$  и  $F_{gm}^S$ , излазна  $(P_{ul} - P_{iz})$ , в) модел М1, улазне величине  $(T_{un} - T_{sp})$  и  $F_{gm}^S$ , излазна  $(P_{ul} - P_{iz})$ , д) модел М2, улазне величине  $T_{un}$  и  $(T_{un} - T_{sp})$ , излазна  $\sigma_{Vmmax}$

Укупан број зависности које је могуће приказати за моделе М1 и М2 са три улазне и једном излазном величином је 3. У случају модела М3 са четири улазне и једном излазном величином укупан број површи које представљају моделом формирану зависност је 6. У даљем делу неће бити приказане све површи зависности осталих развијених фази модела већ само карактеристичне.

Добијене вредности скаларних параметара  $a$ ,  $b$  и  $c$  модела М3 разликују се од горе приказаних параметара за моделе М1 и М2. Вредности тих параметара за улазне и излазне величине модела М3 приказане су у табели 6.1.3. Облици функција трансформације  $f_i$  карактеристични само за модел М3 приказани су на слици 6.1.4.

Зависност излазне величине ( $P_{ul} - P_{iz}$ ) [Pa] од улазних величина успостављена приликом формирања модела М3 и приказана у облику површи зависности приказана је на слици 6.1.5.

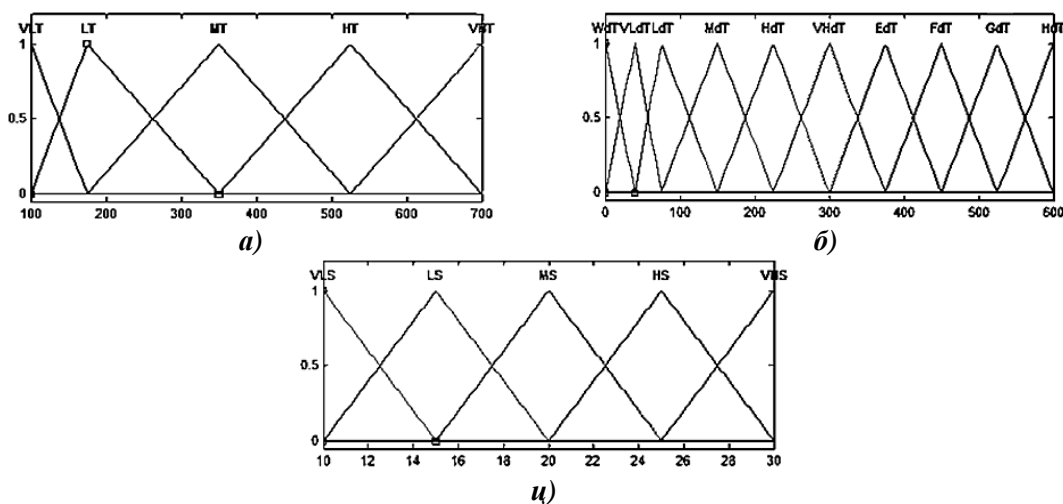
**Табела 6.1.3** Вредности скаларних параметара  $a$ ,  $b$  и  $c$  функције  $f_i$  за улазне и излазне промењиве модела М3

промењива	$T_{un}$ [°C]					$F_{gm}^S$ [-]				
функција	VLT	LT	MT	HT	VHT	LF	MF	HF		
a	100	100	175	350	525	1	1	2		
b	100	175	350	525	700	1	2	3		
c	175	350	525	700	700	2	3	3		
промењива	$(T_{un} - T_{sp})$ [°C]									
функција	WdT	VLdT	LdT	MdT	HdT	VHdT	EdT	FdT	GdT	MdT
a	0	0	40	75	150	225	300	375	450	525
b	0	40	75	150	225	300	375	450	525	600
c	40	75	150	225	300	375	450	525	600	600
промењива	$V_{ul}$ [m/s]					$(P_{ul} - P_{iz})$ [Pa]				
функција	VLS	LS	MS	HS	VHS	VLP	LP	MP	HP	VHP
a	10	10	15	20	25	-100	-200	-300	-400	-400
b	10	15	20	25	30	0	-100	-200	-300	-400
c	15	20	25	30	30	0	0	-100	-200	-300

Коришћење већег броја функција трансформације захтева формирање већег броја правила пресликавања, чиме се омогућава добијање тачнијег резултата [103]. Модел М3 је формиран са више функција трансформације којима се пресликавају улазне величине  $T_{un}$  (пет уместо три) и  $(T_{un} - T_{sp})$  (десет уместо седам) него што је то број функција којима су формиран модели М1 и М2. Формирано је 221 правило пресликавања која чине базу знања модела М3.

При формирању сваког од наведених *Mamdani* модела је за дефазификацију коришћена метода тежишта (6.2) са циљем да се обезбеди линеарна интерполација између правила на основу којих се формира излазна величина [41]. Фази модел *Sugeno* – типа, означен са S, формиран је коришћењем три троугаоне функције трансформације за сваку од улазних варијабли, са 81 функције трансформације излазне промењиве ( $P_{ul} - P_{iz}$ ) типа константе и истим бројем правила пресликавања. Излазна величина је усредњена тежинским

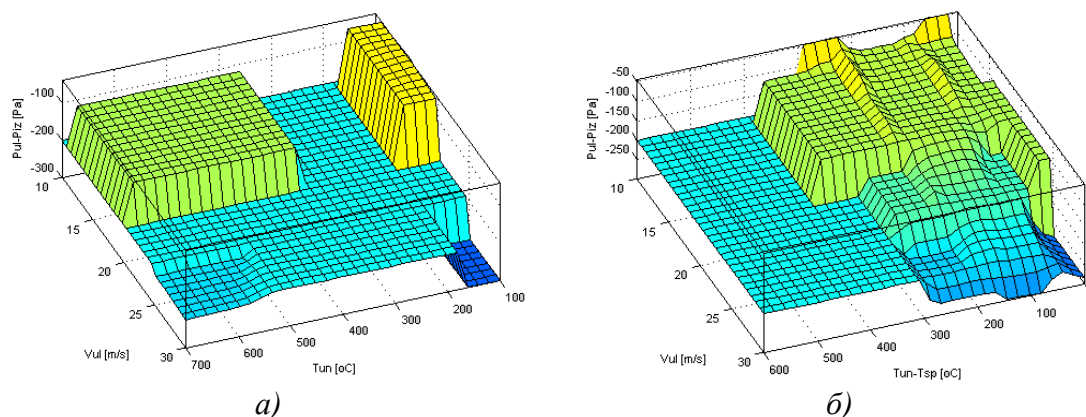
кофицијентима за свако од правила пресликавања. Површина зависности излазне величине ( $P_{ul} - P_{iz}$ ) за улазне величине  $T_{un}$  и  $V_{ul}$  дата је на слици 6.1.8а.



**Слика 6.1.4** Облици функција трансформације  $f_i$  карактеристични само за модел М3: а) температура унутрашњег зида канала  $T_{un}$  [ $^{\circ}C$ ], б) разлика температура унутрашњег и спољашњег зида ( $T_{un} - T_{sp}$ ) [ $^{\circ}C$ ], ц) брзина на улазу  $V_{ul}$  [m/s]

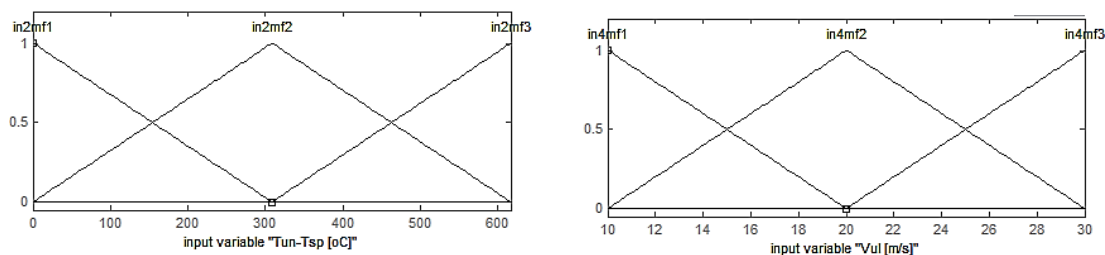
Применом техника неуро-адаптивног учења (*Neuro-Adaptive Learning Techniques*), на основу фази модела *Sugeno* типа означеног са S и комплетног скупа података који чине параметри и решења сваког од 134 нумеричких FSI прорачуна (датих у т. 5.3), формиран су неуро-фази модели (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System - ANFIS*) означени са АН1, АН2 и АН3. Подешавање параметара функција трансформација ових модела је извршено применом алгоритма оптимизације тежинских фактора у комбинацији са методом најмањих квадрата са циљем квалитетнијег описа карактеристика улазних и излазних фази скупова. У циљу потврде репрезентативности скупа података који су искоришћени за израду ових фази модела, основни скуп који чине параметри и резултати 134 нумеричких FSI прорачуна подељен је на скуп од изабраних 96 нумеричких FSI прорачуна који је коришћен за израду фази модела и два скупа података које чине параметри по 20 различитих нумеричких FSI прорачуна. Ови скупови су коришћени за тестирање и проверу формираних фази модела [42-44]. Модел АН1 је формиран са по три функције трансформације троугаоног типа за сваку од 4 улазне промењиве: температура унутрашњег зида канала  $T_{un}$ , разлика температура унутрашњег и

спољашњег зида ( $T_{un} - T_{sp}$ ), брзина на улазу у канал  $V_{ul}$  и фактор густине дискретизационе мреже  $F_{gm}^S$ .



**Слика 6.1.5** Површине зависност излазне величине ( $P_{ul} - P_{iz}$ ) модела МЗ од улазних величина: а)  $T_{un}$  и  $V_{ul}$ , б) ( $T_{un} - T_{sp}$ ) и  $V_{ul}$

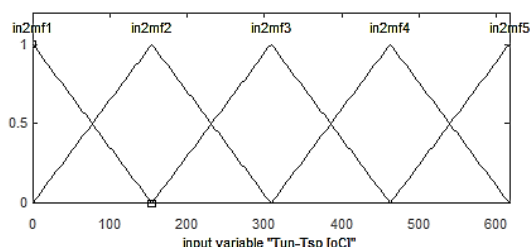
Формирано је 81 функција трансформације излазне величине ( $P_{ul} - P_{iz}$ ) изабрана као константа и формиран је исти број правила. Облици функција трансформације улазних величина ( $T_{un} - T_{sp}$ ) и  $V_{ul}$  за модел АН1 приказане су на слици 6.1.6, а за улазне величине  $T_{un}$  и  $F_{gm}^S$  на сликама 6.1.2а и 6.1.2ц респективно. Површина зависности излазне величине ( $P_{ul} - P_{iz}$ ) за улазне величине  $T_{un}$  и  $V_{ul}$  дата је на слици 6.1.8б.



**Слика 6.1.6** Облици функција трансформације улазних величина ( $T_{un} - T_{sp}$ ) и  $V_{ul}$  за моделе АН1 и АН2

Модел АН2 је као и модел АН1 формиран са по три функције трансформације троугаоног типа за сваку од 4 улазне промењиве и 81 функција трансформације излазне величине ( $P_{ul} - P_{iz}$ ) и истим бројем правила, стим што је у случају модела АН2 изабрано да функција трансформације буде линеарна. Облици функција

трансформације улазних величина ( $T_{un} - T_{sp}$ ) и  $V_{ul}$  за модел АН2 приказане су на слици 6.1.6, а за улазне величине  $T_{un}$  и  $F_{gm}^S$  на сликама 6.1.2а и 6.1.2ц респективно.

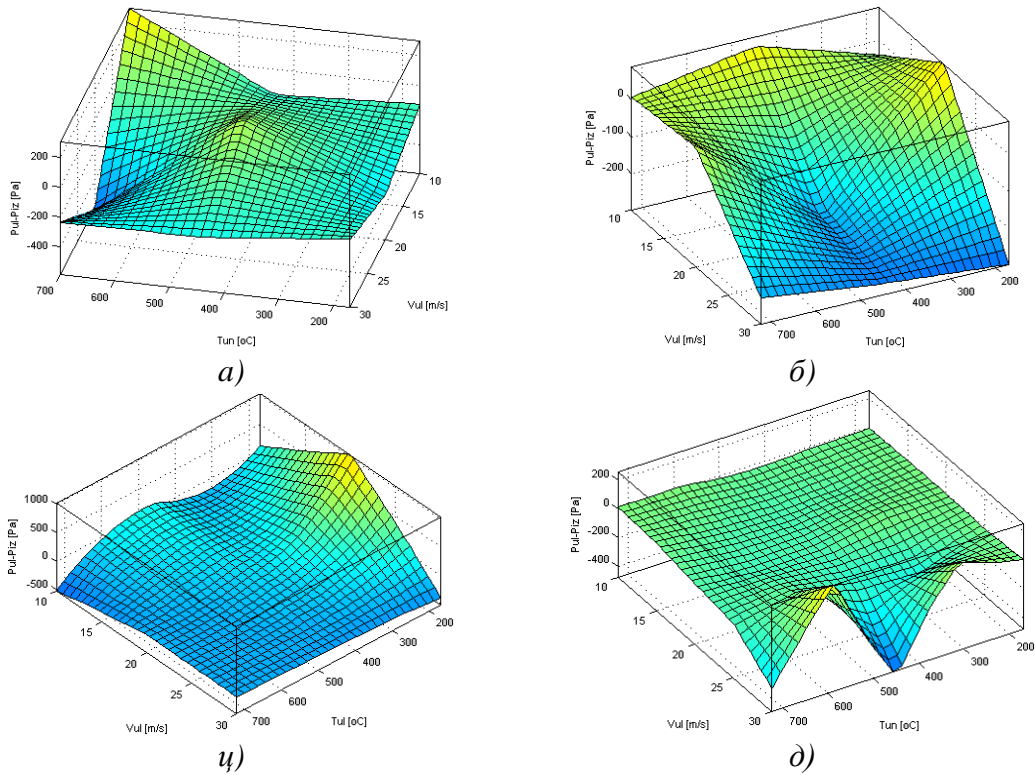


Слика 6.1.7 Функције трансформације улазне величине ( $T_{un} - T_{sp}$ ) модела АН3

Површина зависности излазне величине ( $P_{ul} - P_{iz}$ ) за улазне величине  $T_{un}$  и  $V_{ul}$  дата је на слици 6.1.8ц. Модел АН3 је формиран са по пет функција трансформације троугаоног типа за улазне промењиве. Температура унутрашњег зида канала  $T_{un}$  дата је на сл. 6.1.2а, разлика температура унутрашњег и спољашњег зида ( $T_{un} - T_{sp}$ ) на сл. 6.1.7, брзина на улазу у канал  $V_{ul}$  дата је на сл. 6.1.4ц, док је промењива фактор густине дискретизационе мреже  $F_{gm}^S$  моделиран са три функције трансформације (сл. 6.1.2ц). Формирано је 81 функција трансформације излазне величине ( $P_{ul} - P_{iz}$ ) изабраних као константа и формиран је исти број правила. Облици функција трансформације улазних величина ( $T_{un} - T_{sp}$ ) и  $V_{ul}$  за модел АН1 приказане су на слици 6.1.6, а за улазне величине  $T_{un}$  и  $F_{gm}^S$  на сликама 6.1.2а и 6.1.2ц респективно. Површина зависности излазне величине ( $P_{ul} - P_{iz}$ ) за улазне величине  $T_{un}$  и  $V_{ul}$  дата је на слици 6.1.8д.

Облици површи зависности излазне величине ( $P_{ul} - P_{iz}$ ) фази модела *Sugeno* типа од улазних величина  $T_{un}$  и  $V_{ul}$  приказане на слици 6.1.8 рефлектују нелинеарност посматране зависности, али немају зоне са изразитим градијентом промене или константним вредностима као што је то случај за *Mamdani* модел (сл. 6.1.5а). Такође указују на предност коришћења аутоматских техника неуро-адаптивног учења за одређивање параметара функција трансформације у односу на мануелни метод коришћен при формирању *Mamdani* модела. Очито да није баш увек једноставно а често и могуће проценити вредности тежинских фактора сваке од

функција трансформација за већи број улазних величина и веће фази скупове улазних података.



**Слика 6.1.8** Површине зависност излазне величине ( $P_{ul} - P_{iz}$ ) фази модела Sugeno типа од улазних величина  $T_{un}$  и  $V_{ul}$ , а) модел S, б) модел АН1, ц) модел АН2 и д) модел АН3

## 6.2 Резултати добијени коришећењем Mamdani модела

У табели 5.3.5 су приказани резултати 52 параметарски дефинисана проблема нумеричке симулације интеракције флуида и структуре канала за  $V_{ul} = 30\text{m/s}$  (публиковани у [73]). Између осталих резултата, приказане су прорачунате вредности пада статичког притиска низ струју које ћемо у овом поглављу обележити са  $(P_{ul} - P_{iz})_{FSI}$  и максимална вредност остварених комбинованих *Von Mises*-ових напона у структури, који ћемо у овом поглављу обележити са  $\sigma_{VMmax_{FSI}}$ . Табела садржи вредности параметара  $T_{un}$ ,  $(T_{un} - T_{sp})$  и  $F_{gm}^S$  којима је дефинисан

сваки од нумеричких прорачуна. Над овим скупом података су формирани фази модели *Mamdani* типа M1 и M2, на начин како је то објашњено у т. 6.1. Резултати (излазне величине) примене фази модела на вредностима из скупа улазних величина  $T_{un}$ ,  $(T_{un} - T_{sp})$  и  $F_{gm}^S$  су обележене са  $(P_{ul} - P_{iz})_{FIS}$  за моделе M1 и M3, а са  $\sigma_{VMmax FIS}$  за модел M2.

Вредности пада притиска  $(P_{ul} - P_{iz})_{FSI}$  добијене спрегнутим нумеричким FSI симулацијама интеракције флуид-структура, као разлике прорачунатих вредности статичких притисака у улазном и излазном пресеку струјног домена, приказане су на сл. 6.2.1а упоредо са вредностима  $(P_{ul} - P_{iz})_{FIS}$  добијених коришћењем *Mamdani* модела M1. Без обзира што је скуп улазних података био релативно мали (по 52 податка за сваку од посматране три улазне промењиве), резултати добијени коришћењем *Mamdani* модела M1 за тај скуп улазних података су веома блиски резултатима спрегнуте нумеричке FSI анализе (слика 6.2.2а). Међутим, тако приказани резултати нису адекватан начин за поређење резултата добијених нумеричком FSI симулацијом са резултатима добијеним применом фази модела.

За процену способности фази модела да предвиди резултате нумеричких FSI симулација коришћене су следеће величине:

- релативно одступање излазне величине  $(P_{ul} - P_{iz})_{FIS}$  фази модела од вредности добијене нумеричким FSI прорачуном  $(P_{ul} - P_{iz})_{FSI}$

$$RO_P = 100 \cdot \left( (P_{ul} - P_{iz})_{FSI} - (P_{ul} - P_{iz})_{FIS} \right) / (P_{ul} - P_{iz})_{FIS} \quad [\%] \quad (6.4)$$

- релативно одступање излазне величине  $\sigma_{VMmax FIS}$  фази модела од вредности добијене нумеричким FSI прорачуном  $\sigma_{VMmax FSI}$

$$RO_{VMmax} = 100 \cdot \left( \sigma_{VMmax FSI} - \sigma_{VMmax FIS} \right) / \sigma_{VMmax FIS} \quad [\%] \quad (6.5)$$

- средња вредност релативног одступања

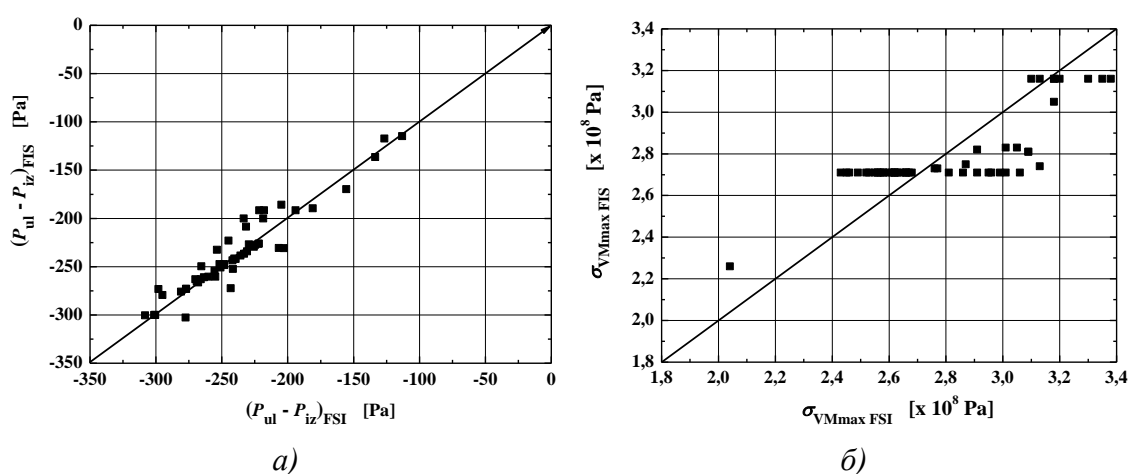
$$\overline{RO} = \frac{\sum_{i=1}^n RO_i}{n} \quad (6.6)$$

где је  $n$  – број чланова фази скупа, једнак броју нумеричких FSI прорачуна,

- стандардна девијација релативног одступања излазне величине

$$STDEV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (RO_i - \overline{RO})^2}{(n-1)}} \quad (6.7)$$

- подешена сума квадрата резидуала фитоване групе података  $R^2$ , јед. (5.2.1.3).



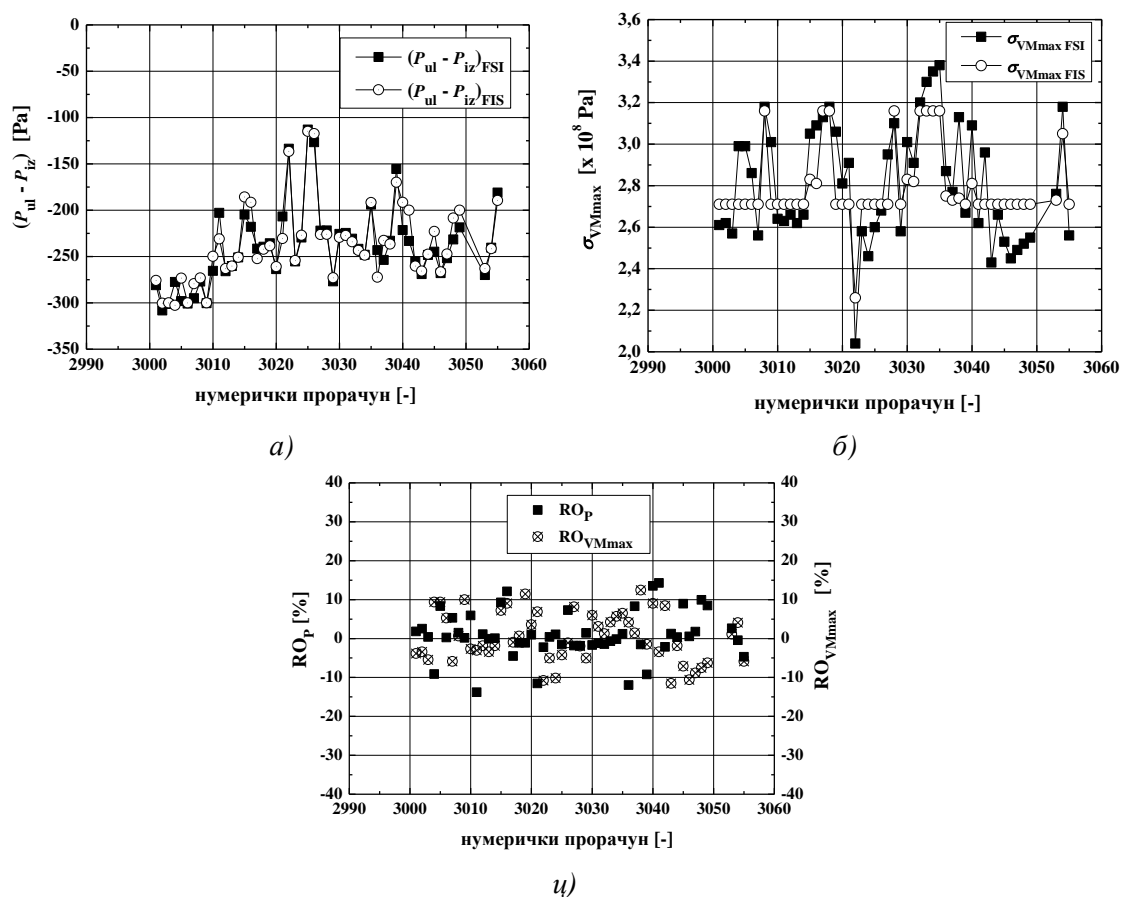
**Слика 6.2.1** Упоредни приказ резултата добијених коришћењем *Mamdani* модела и резултата нумеричке FSI анализе, а)  $(P_{ul} - P_{iz})_{FIS}$  [Pa] за модел M1 и б)  $\sigma_{VMmax}$  [ $\times 10^8$  Pa] за модел M2

За излазну величину  $(P_{ul} - P_{iz})_{FIS}$  модела M1 добијена је средња вредност релативног одступања излазне величине  $\overline{RO} = 0,9\%$  са граничним вредностима одступања у опсегу  $-13.8 < RO_P < 14.3\%$ ,  $STDEV = 5.97$  и  $R^2 = 0,901$ . Релативна одступања резултата добијених коришћењем фази модела M1 и M2 у односу на резултате добијене спрегнутом FSI нумеричком симулацијом приказана су на слици 6.2.2ц. Са слике се види да за највећи број случајева грешка лежи у границама  $-10 < RO < 10\%$ , за обе излазне величине  $(P_{ul} - P_{iz})$  и  $\sigma_{VMmax}$ .

Тачност развијеног *Mamdani* модела M1 се додатно може побољшати коришћењем улазног скупа са већим бројем података, посебно ако би коришћени скуп садржао резултате прорачуна за граничне случајеве ( $T_{un} - T_{sp} \approx 0$ ). Утицај врсте коришћене функције трансформације и вредности коришћених тежинских



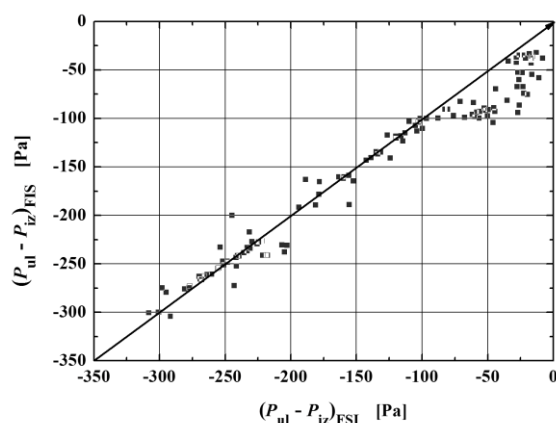
фактора трансформације на крајњи резултат се не може унапред проценити, већ то мора да буде предмет додатних анализа.



**Слика 6.2.2** Карактеристике Matdani модела у предвиђању резултата FSI прорачуна, а) модел M1, б) модел M2, ц) релативно одступање резултата добијених моделима M1 and M2 у односу на резултате FSI прорачуна

Максималне вредности *Von Misses*-ових напона деформисане структуре  $\sigma_{VMmax}$  FSI добијене спрегнутим FSI нумеричком анализом дате су на слици 6.2.1б упоредо са вредностима  $\sigma_{VMmax}$  FLES које су добијене као излазне величине фази модела Matdani типа означеног са M2. Примећује се одступање добијених резултата манифестовано већим расипањем око праве на сл. 6.2.1б, са оствареном вредношћу од  $R^2=0,624$ . За укупан сет резултата прорачунатих Matdani моделом M2 остварена је средња вредност релативног одступања излазне величине  $\overline{RO} = 0,3\%$  са граничним вредностима у опсегу  $-12.5 < RO_{VMmax} < 12.5\%$  и  $STDEV =$

6,44 (слика 6.2.2б). На основу ових вредности и приказа на слици 6.2.2.ц би се извукао погрешан закључак о релативно добром квалитету модела М2. Међутим, слике 6.2.1.б и 6.2.2б указују на приметно лош резултат процене излазне величине  $\sigma_{V_{\max}}$ , што се може објаснити чињеницом да је расподела напона у структури веома нелинеарна, при чему је положај релативно мале зоне где се појављује максимална вредност напона  $\sigma_{V_{\max}}$  условљена таласним обликом деформисања бочних страна. Ово је директна последица резултата приказаних у т. 5.2.6 – 5.2.10 и чињенице да већ при релативно ниском термичком оптерећењу од око  $T_{\text{un}} \approx 50^{\circ}\text{C}$  долази до постизања напона на граници еластичности. Добијени резултати су у складу са закључцима студије [38] обзиром да је нагла промена вредности напона чврсто повезана са положајем зоне где се појављује  $\sigma_{V_{\max}}$ , дакле од облика који заузму деформисане плоче канала. Са слике 6.2.1б видимо да су резултати добијени коришћењем модела М2 груписани око вредности  $2,3 \cdot 10^8$  Ра,  $2,7 \cdot 10^8$  Ра и  $3,5 \cdot 10^8$  Ра. Узрок овоме и релативно ниске вредности  $R^2$  лежи у чињеници да је излазна величина  $\sigma_{V_{\max}}$  фази модела М2 моделирана са само три функције трансформације најједноставнијег троугаоног типа (слика 6.1.2.е). Тај модел очито није у могућности да на адекватан начин представи нелинеарност промене излазне величине.



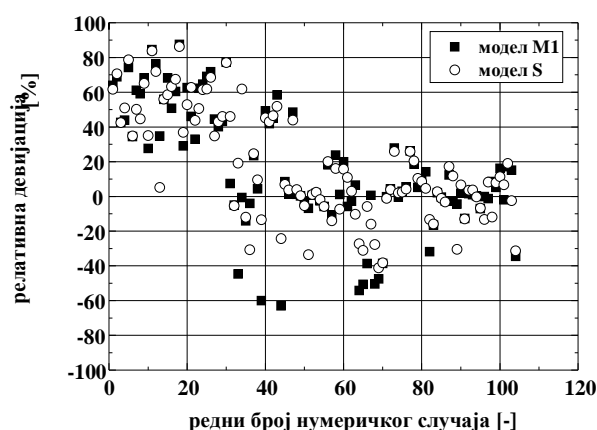
*Слика 6.2.3 Поређење резултата FSI нумеричког прорачуна и резултата добијених применом фази модела М3*

Поредећи резултате добијене нумеричким FSI прорачуном и коришћењем модела М3 (слика 6.2.3), остварена је већа вредност параметра  $R^2 = 0.946$  линеарне

регресије скупа података ( $P_{ul} - P_{iz}$ ). При томе је добијено средње релативно одступање излазне величине  $\overline{RO} = -17,5\%$  са граничним вредностима у опсегу  $-81,1 < RO_p < 22,4\%$  и  $STDEV = 25,1$ . Узрок овоме је првенствено у расутости вредности релативног одступања око праве  $(P_{ul} - P_{iz})_{FIS} = (P_{ul} - P_{iz})_{FSI}$  за вредности  $(P_{ul} - P_{iz}) > -100Pa$ , што су вредности које се добијају као резултати нумеричким FSI прорачуном за мале вредности улазног параметра  $V_{ul}$ . Стога повећање релативног одступања излазне величине  $(P_{ul} - P_{iz})$  при мањим вредностима  $(P_{ul} - P_{iz})$  није само последица "лоших" резултата добијених моделом M3 већ и чињенице да се ради о малим вредностима  $(P_{ul} - P_{iz})$ .

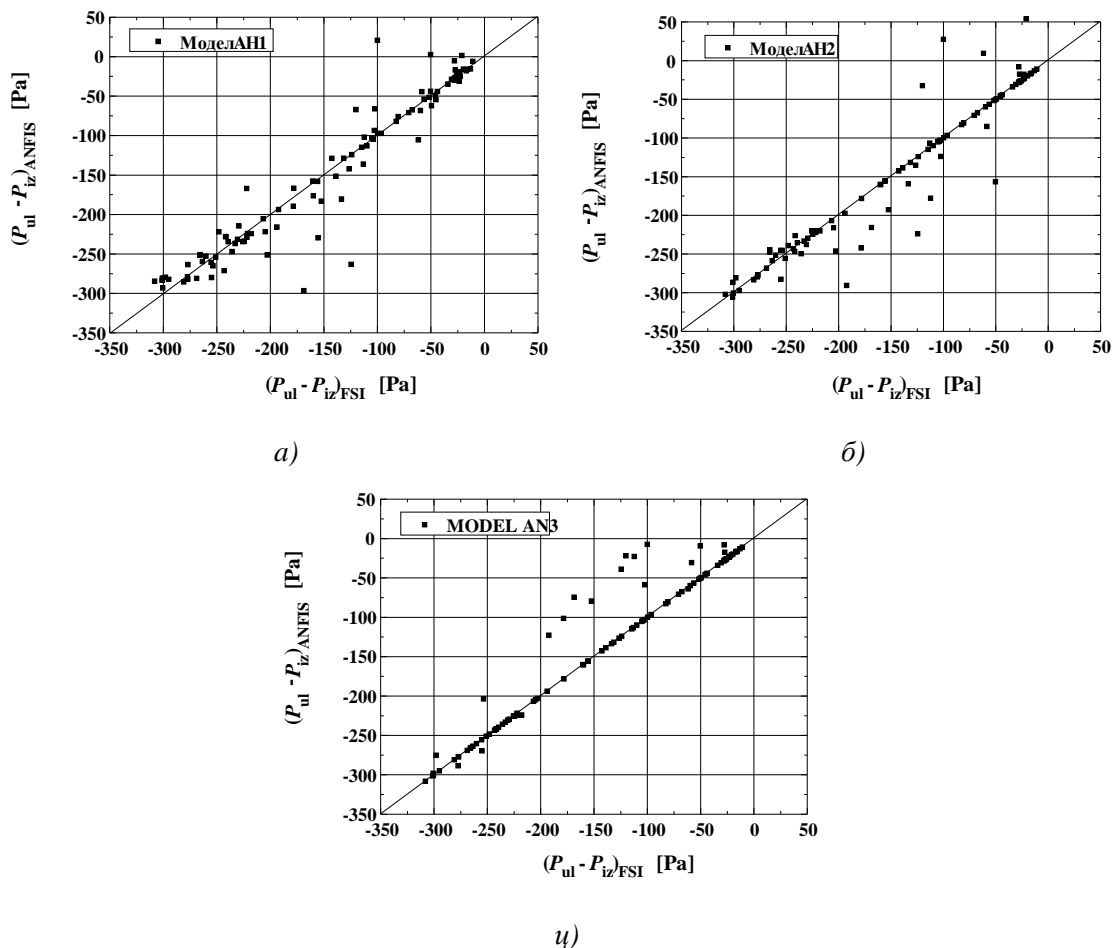
### 6.3 Резултати добијени коришћењем Sugeno модела

На слици 6.3.1 представљена је релативна девијација у предвиђању вредности  $(P_{ul} - P_{iz})$  коришћењем Mamdani модела M1 и Sugeno модела S у односу на резултате нумеричког FSI прорачуна (публиковани у [74]). Оба модела дају боље резултате за више вредности улазних брзина остварујући мање вредности релативне девијације (-40% to 20%).



Слика 6.3.1 Релативна девијација резултата добијена коришћењем Mamdani модела M1 и Sugeno модела S

За ниже вредности  $V_{ul}$  релативна девијација се повећава и до 80%, првенствено услед не постојања довољног броја података за ниже вредности  $V_{ul}$  као и чињенице да су вредности  $(P_{ul} - P_{iz})$  ниже при мањим брзинама, што доводи до повећања вредности релативне грешке (слика 11 за вредности  $(P_{ul} - P_{iz})$  у опсегу од -50Pa до 0Pa). Слика 6.4.1 приказује упоредо резултате прорачуна излазне величине  $(P_{ul} - P_{iz})$  означене са  $(P_{ul} - P_{iz})_{ANFIS}$  коришћењем ANFIS модела и резултата одговарајућих FSI прорачуна исте излазне величине, означено са  $(P_{ul} - P_{iz})_{FSI}$ . Линеарном регресијом приказаних резултата добијено је  $R^2 = 0,917$ ,  $R^2 = 0,918$  и  $R^2 = 0,940$  за резултате добијене моделима AN1, AN2 и AN3 респективно.



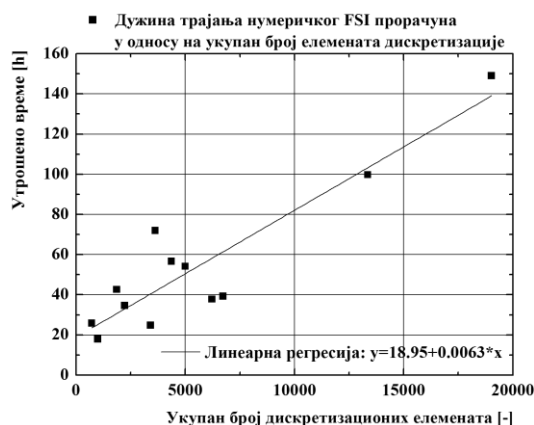
Слика 6.3.2 Упоредни приказ резултата ANFIS и FSI прорачуна: а) модел AN1 ( $R^2 = 0,917$ ), б) модел AN2 ( $R^2 = 0,918$ ), ц) модел AN3 ( $R^2 = 0,940$ )

У односу на горе приказане резултате добијене коришћењем *Mamdani* и *Sugeno* фази модела, ANFIS модели дају донекле боље резултате у предвиђању вредности  $(P_{ul} - P_{iz})$  у целом опсегу улазних брзина  $V_{ul}$ . Повећање броја улазних функција трансформације доводи до смањења средње грешке тестирања сета података, док примена линеарних уместо константних излазних функција трансформације није довела до значајнијег побољшања резултата. Добијени резултати рефлектују познате карактеристике фази модела примењених за предвиђање параметара нелинеарних проблема. Већи број улазних података и релација успостављених између њих и излазних параметара омогућује боље представљање посматраног проблема а тиме и прецизније предвиђање излазних параметара. Међутим, осим броја, од изузетне важности је да скуп улазних података у што већем броју чине вредности утицајних параметара из зоне у којој се дешава нагла промене посматране појаве. Фази модели *Mamdani* и *Sugeno* типа су у одређеној мери инфериорнији од ANFIS модела обзиром на тачност предвиђања вредности излазног параметра, али то не мора да буде генерални закључак. Одговор на питање да ли би примена других или чак истих функција трансформације улазних величина фази модела *Mamdani* и *Sugeno* типа, само у већем броју и другачијих карактеристика, допринели и у којој мери повећању прецизности предвиђања резултата овог FSI прорачуна, биће предмет будућег истраживања. Осим довољне прецизности предвиђања посматраних излазних величина, истаћи ћемо и чињеницу да је ANFIS моделе много лакше и брже формирати него остале типове фази модела.

### *Време трајања прорачуна*

Осим од вредности фактора  $F_{gm}$ , време трајања нумеричког FSI прорачуна зависи од односа вредности задатих параметара  $T_{un}$  и  $T_{un}-T_{sp}$ . У неким случајевима било је потребно и преко 150 сати да се на коришћеном рачунарском систему добије финално решење (слика 6.4.2). За нумерички FSI прорачун модела који се састоји од око 100.000 дискретизационих елемената (коначних елемената љуске и коначних запремина заједно, што би одговарало фактору густине мреже  $F_{gm} = 6$ ),

на коришћеном рачунарском систему би било потребно око 637 сати, док би за процесирање модела са око 300.000 елемената ( $F_{gm} = 10$ ) било потребно 1909 сати. Ово је био основни разлог зашто није формиран шири сет улазних података, са већим бројем чланова скупова улазних промењивих и зашто је максимална вредност параметра  $F_{gm}$  била 3.



Слика 6.3.3 Време трајања FSI нумеричког прорачуна у зависности од  $F_{gm}$  [-]

Утицај величине меморијског простора и осталих хардверских карактеристика рачунарског система на брзину и могућност спровођења нумеричког FSI прорачуна није анализиран у овом раду. Са друге стране, време спровођења нумеричког прорачуна модела фази логике је реда од делова секунде до десетине секунди.

## 7. Закључак

При раду система за плазмахемијску припалу аеросмеше се ослобађа, првенствено радијацијом, велика количина топлоте која неравномерно загрева зидове канала аеросмеше. Мерења температуре спољашње површине зида канала обављена током 2007. год. на два реконструисана канала аеросмеше на блоку А1 термоелектране ТЕНТ-А су показала да се одређене зоне зидова канала аеросмеше при погонским условима млина и плазматронског постројења загреју и преко 950°C. Канали су кутијасте структуре промењивог пресека које се састоје од челичних, танкозидних, међусобно заварених плоча. Резултати серије статичких структуралних термонапонских симулација за четири предложена реконструктивна решења [3] су истакли предности концепције кружног попречног пресека са котрљајућим ослонцима [4,5] у погледу најнижих вредности и најприхватљивије расподеле *Von Misses*-ових напона у структури канала, као и оствареног облика деформисања. Концепција са каналима правоугаоног попречног пресека је и даље актуелна највише из разлога што не захева додатне реконструктивне захвате замене постојећих канала правоугаоног попречног пресека, чиме се смањују трошкови пројекта. На основу резултата досадашњих истраживања [6] следи да је за успешно потпаљивање и остваривање делимичног сагоревања угљеног праха потребно да након локалног паљења дела честица угљеног праха буде остварено простирање пламена и сагоревање угљеног праха и у суседним областима у каналу. Параметри који на ово директно утичу су путања којом се честица креће кроз канал и њено време задржавања у одређеним зонама канала. Стога је од великог значаја одредити утицај који термички деформисани канал има на струју која протиче кроз њега.

Пренос топлоте и притисног оптерећења струје флуида на танкозидну плочу, која услед тога остварује значајна померања и деформације, у себи обухвата истовремено термичке, проблеме геометријске нелинеарности а због високих температура којима је структура изложена и проблеме нелинеарности материјала

и појаве пластичности. Због свега наведеног одлучено је да се за анализу наведених проблема примене нумеричке методе применом компјутера.

Применом *Ritz*-ове методе о минимуму укупне потенцијалне енергије изотропне, термички оптерећене танке плоче константне дебљине, заменом адекватно изабраних функција померања које задовољавају постављене граничне услове и репрезентују облик извијања средње површи плоче, аналитички су одређене вредности критичних температуре при којој долази до губитка стабилности плоча које чине прву секцију канала за неколико различитих случајева ослањања. Одређене су вредности температуре при којој долази до појаве пластичних деформација у средњој равни посматране плоче. Добијени резултати су приказани у поглављу 2, а коришћени су при анализи резултата датих у поглављу 5.3.

За решавање постављеног проблема интеракције структуре канала и струје ваздуха примењена је спрега нумеричких метода просторне дискретизације континуума и то за структуру и методе коначних запремина за струјање флуида. За одређивање напонско – деформационог стања у структури канала аеросмеше коришћен је комерцијални софтверски пакет ANSYS базиран на методе коначних елемената - методи померања [24]. На основу претходних разматрања времена потребног за пренос утицаја термичке појаве, брзине простирања звука у чврстом телу и у флуиду, утврђено је да се наш проблем термички оптерећеног канала може решавати као статички случај, независан од времена [77, 89]. Софтвер користи принцип виртуалног рада у комбинацији са *Rayleigh–Ritz* –овом методом. Дискретизација структуралног домена извршена је коначним елементима љуске различитих типова. Геометријске и нелинеарности материјала су узете у обзир развојем тангентне матрице крутости. У циљу дефинисања модела материјала који ће бити коришћен у параметарској анализи, извршени су нумерички прорачуни и упоређени добијени резултати спрегнутих *FSI* анализа за моделе са билеарним кинематским и билинеарним изотропским моделом. За ниже вредности термичког оптерећења структуре канала ( $T = 300^{\circ}\text{C}$ ) су добијене скоро истоветне вредности померања у правцу *z*-осе, са малим разликама у прорачунатим екстремним вредностима *von Mises*-ових напона. За коришћење у



параметарским прорачуним је стога усвојен класичан билинеарни модел пластичности са кинематским ојачањем и *Von Misses* – овим условом течења. За решавање добијеног сета линеаризованих једначина коришћена је Њутн-Рапсонова итеративна метода. Оптерећење је уношено инкрементално према унапред задатом кораку уноса оптерећења. Увођењем претпоставки о стационарној и униформној расподели температура на додирној површини струјног и структуралног домена као и на спољашним површинама зидова канала, спрегнути струјно-термичко-структурални нумерички прорачун је поједностављен увођењем претпоставке о расподели униформног температурског поља на унутрашњим и спољашњим зидовима канала. Главни разлог за увођење овакве претпоставке о расподели температура је што су тачност и стабилност оваквог прорачуна током времена осетљиви на разне параметаре моделовања [49, 51]. Један од проблема је и генерисање дискретизационе мреже потребног квалитета у оба домена. Рачунарски захтеви по питању времена потребног за прорачун, као и меморијског простора потребног за смештај података су велики, јер *FSI* симулација захтева још финију мрежу и краћи временски корак, те се мора изводити на снажним рачунарским системима [31].

Конзервативне форме Рејнолдс усредњених Навије-Стоксових једначина за нестишљиво нестационарно струјање Њутновског флуида решаване су применом софтверског пакета ANSYS CFX. Две додатне једначине, *k- $\omega$  Wilcox*-овог модела у елементима близу зида канала [84] и стандардни *k -  $\epsilon$*  модел [108] у осталом делу струје су коришћени за формирање комплетног система једначина струјања. Услед кретања додирне површине структуралног и струјног домена, дискретизационе једначине су модификоване да омогуће брзину чворова мреже различиту од нуле и промењиву запремину елемента куначних запремина [111]. Деформација мреже је одређена преко уведеног фактора крутости мреже, који је дефинисан као обрнуто пропорционалан удаљењу од зида у циљу оцене дисторзије мреже коначних запремина у области близу зида [35].

Једначине динамике флуида и структуралне механике су спрегнуте условом да су положај и брзина тачке која је заједничка за струјни и структурални домен, тј.

лежи на површи раздвајања ова два домена, исте у сваком од домена. [38, 45]. Коришћена је процедура итеративног узастопног спрезања [37]. Временски и просторно дискретизоване нелинеарне диференцијалне једначине којима су моделирана понашања структуре и флуида решаване су посебно [37, 38]. Алгоритам спрезања се одвија кроз серију глобалних корака развоја спрегнутог прорачуна са одређеним бројем итерација спрезања у оквиру сваког корака. Током итерације спрезања врши се прикупљање и размена података између нумеричких прорачуна. Алгоритам претраге по блоковима и метод преноса утицаја интерполацијом са одржањем профила су коришћени за пренос оптерећења између домена [24, 26]. Резултати приказани у т. 5.3 указују на то да избор модела преноса оптерећења утиче на добијени резултат, као што је добијено и у студији [33]. Добијени резултати указују да је примена модела преноса оптерећења са очувањем профила мање осетљива на разлику у густинама различитих нумеричких мрежа. У случају када је густина структуралне нумеричке мреже мања од густине нумеричке мреже струјног домена, примена конзервативног модела доводи до веома нестабилног прорачуна, поготово у делу прорачуна када се врши пренос почетног оптерећења струје на структуру.

Конвергенција глобалног прорачуна спрезања се проверава након завршетка преноса оптерећења између прорачуна и у случају да услови конвергенције нису задовољени, започиње се са новом петљом итерације спрезања. У оквиру овог рада посебна пажња је посвећена анализи утицаја величине корака уноса оптерећења (било да се ради о структуралном или спрегнутом нумеричком прорачуну) и начину његове примене у прорачун. Детаљна разматрања о утицају ових параметара на тачност, конвергентност и могућност завршавања прорачуна је извршена на конкретним случајевима у т. 5.2.6 – 5.2.8 и т.5.3. Добијени резултати указују да је утицај овог параметра веома значајан. У циљу добијања конвергентног решења потребно је да корак буде довољно мали, али и да се обезбеди довољан број подкорака уноса оптерећења. Повећање броја итерација није дало допринос побољшању конвергенције. Шта више, у неколико случајева повећање броја итерација и преко разумне границе (од 15 итерација) није довело до конвергенције. Инкремент посматраног параметра конвергенције постаје

довољно велики да изађе ван граница дефинисаних критеријумима конвергенције. Утврђено је да је за успешно конвергирање прорачуна потребно остварити величину корака уноса термичког оптерећења у границама  $0,5 < \Delta T < 1,0^\circ\text{C}$ , по могућности и мањи. Међутим, смањење величине корака  $\Delta T$  значајно придужава време прорачуна и излаже прорачун нумеричкој нестабилности.

У т. 5.2.3 су дати резултати испитивања утицаја гравитационог оптерећења на деформисање структуре. Прорачуном је као највеће померање центара "хоризонталних" плоча секције 1 добијено  $\sim 2\%$  дебљине плоче  $h$ , при чему плоче формирају облик који личи на полуталасни и испупчене су у правцу дејства гравитације, а скоро четвртина чворова ове плоче остварује померања већа од  $1\%$   $h$ . Резултати утицаја термичког оптерећења на деформисање канала дати су у т. 5.2.6. Посматрана су померања одабраних чворова нумеричке мреже и вредности остварених *Von Mises*-ових напона. Резултати указују да се "хоризонталне" плоче секције 1 са уносом оптерећења прво деформишу у форму облика (1,1) а затим прелазе у форму (3,1). Промена облика није нагла али се дешава у малом температурском опсегу. Померање посматраних чворова не указује на постојање наглих и скоковитих прелазака из једног у другог равнотежно стање. За вредност  $T_{\text{un}} \approx 33^\circ\text{C}$  се остварују напони са вредностима  $\sigma_{\text{VM}} > \sigma_y$  у ћошковима плоча секције 1 (слика 5.2.6.4б). Вредности  $\sigma_{\text{VM}}^{\text{MID}}$  у средњој површи коначних елемента које сече раван симетрије су два пута нижа од  $\sigma_y^{T=50^\circ\text{C}} = 230 \cdot 10^6 \text{ Pa}$  (сл. 5.2.6.5а) што је приближна вредност  $\sigma_y$  за  $T_{\text{un}} = 50^\circ\text{C}$ . Са повећањем  $T_{\text{un}}$  вредности  $\sigma_{\text{VM}}^{\text{MID}}$  се чак и смањују (сл. 5.2.6.5ц), сем за елементе који се налазе близу ослонаца укљештења као и споја секција 2 и 3. Са друге стране, вредности *Von Mises*-ових напона на спољашним  $\sigma_{\text{VM}}^{\text{TOP}}$  и унутрашњим  $\sigma_{\text{VM}}^{\text{BOT}}$  површинама коначних елемената који се налазе у зони ослонаца али и у зони тачака са највећим померањима плоча секције 1 су у нивоу са вредности  $\sigma_y^{T=50^\circ\text{C}}$ . Са повећањем  $T_{\text{un}}$  зоне са коначним елементима код којих  $\sigma_{\text{VM}}^{\text{TOP}}$  и  $\sigma_{\text{VM}}^{\text{BOT}}$  достижу или чак прелазе вредност  $\sigma_y^{T=300} = 222,4 \cdot 10^6 \text{ Pa}$  (вредност  $\sigma_y$  за  $T_{\text{un}} = 300^\circ\text{C}$ ) се проширују све до ослонаца, слике 5.2.6.5ц и 5.2.6.5д, као и слике 5.2.6.4д и 5.2.6.4г.

Резултати приказани у тачки 5.2.8. указују да се "хоризонталне" плоче секције 1 прво испупчавају ка унутрашњости канала за веома мале вредности температурног оптерећења а са даљим уносом оптерећења мењају смер и на крају се испупчавају у спољашњу страну.

У поглављу 5.3 су табеларно представљени резултати спрегнутих параметарских нумеричких прорачуна са двосмерним преносом утицаја. На основу улазних параметара  $V_{ul}$ ,  $T_{un}$ ,  $T_{un} - T_{sp}$  и  $F_{gm}$  и прорачуном добијених вредности за  $P_{ul} - P_{iz}$  и  $\sigma_{V_{max}}$  генерисане су базе података на основу којих су формирано фази модели. Покушај да се одредити утицај вредности  $V_{ul}$  на остварени облик није био успешан, али је примећено да се при мањим брзинама појављују скоро сви облици приказани у табели 5.3.6, док се при  $V_{ul} = 30\text{m/s}$  чешће појављују форме са два полуталаса у правцу  $x$ -осе и једним полуталасом у правцу  $y$ -правцу. Истакнути су случајеви код којих је уочена потврда да величина корака уноса оптерећења може да утиче на форму деформисања која ће се појавити. Објашњено је понашање "хоризонталних" плоча секције 3 чије испупчавање одређује термички индуковани момент као последица разлике температура унутрашњих и спољашњих површина зида канал. Из облика приказаних кривих померање-оптерећење за изабране чворове нумеричке мреже се види да при оптерећивању плоче не долази до извијања услед губитка стабилности и да је њихово понашање карактеристично за геометријски неидеалне плоче.

У поглављу 5.3.1 је приказан утицај деформисања канала на параметре струјања кроз канал. Указано је на значајан утицај који има деформисани канал на струју ваздуха. Изведене су једначине кривих фитовања приказаних вредности, које се могу искористити за одређивање граничне вредности ( $P_{ul} - P_{iz}$ ) при некој другој вредности  $V_{ul}$ . Резултати нумеричких прорачуна указују на продужење времена боравка флуидног делића у каналу. Овај закључак није тако директан и за честицу угља и требало би посебно испитати утицај струјног поља кроз деформисани канал на путање честица различитих гранулација.

У поглављу 6 су приказани модели фази логике развијени на основу сета резултата приказаних у поглављу 5.3 за предвиђање резултата потпуно спрегнуте

FSI анализе. Утврђено је да фази модели *Mamdani* и *Sugeno* типа су у одређеној мери инфериорнији од ANFIS модела обзиром на тачност предвиђања вредности излазних параметара.

Услед проблема истакнутих у поглављима 5.2 и 5.3, за адекватно решавање спрегнутих параметарских нумеричких прорачуна интеракције термички оптерећене равне плоче и флуида који струји преко плоче, потребно је да:

-корак уноса термичког оптерећења буде довољно мали, у нашем случају  $\Delta T < 1^\circ\text{C}$ , да би током процеса оптерећивања плоча пролазила кроз сва равнотежна стања почев од основног,

-услови конвергенције морају сходно томе да буду довољно оштри, што условљава да треба остварити довољан број подкорака у оквиру сваког од корака уноса оптерећења као и број итерација потребан да се дође до конвергентног решења на крају сваког од корака уноса оптерећења,

-дискретизационе мреже два различита домена на површини њиховог раздвајања би требало да се поклапају. Већи број елемената са једне или друге стране површи раздвајања може довести до сасвим другачијег резултата у форми извијања, при чему је прорачун осетљивији на случај са већим бројем елемената у домену флуида.

Са друге стране, поставља се питање сврсисходности решавања нашег конкретног проблема канала састављеног од идеално равних плоча, од идеалног материјала и са идеално постављеним условима ослањања. Несавршености су неминовне у реалној конструкцији, неке је тешко унапред одредити а неке чак и немогуће. Резултати прорачуна указују да ће се канал значајно деформисати, већ при нижим температурама од око  $300^\circ\text{C}$ , што доводи до смањења површине попречног пресека канала у делу секције 1 и до 30% са испупчавањем плоча те секције у таласне облике зависно од задатог термичког оптерећења.

Резултати нумеричких прорачуна указују да се при одређеним облицима деформисања продужава време задржавања флуидних делића у каналу. Аналогно, постоје облици деформисања канала који то време скраћују.

Облик у који ће се деформисати термички оптерећена плоча канала, а тиме на одређени начин и време боравка флуидног делића у одређеним зонама канала, као и ниво термички индукованог напона у структури канала, може бити контролисан коришћењем одговарајућих двокомпонентних материјала плоча са промењивим карактеристикама по пресеку плоче (*Functionally Graded Materials* – FGM). Концепт FGM је први пут примењен 1984. год. у Јапану у оквиру пројекта развоја свемирске летелице, где комбинација материјала треба да буде термичка баријера у стању да издржи површинске температуре 2000 К и температурске градијенте 1000 К кроз плочу дебљине 10 mm. Овај концепт постаје све интересантнији истраживачима из Европе, где је 2006. год. формиран регионални истраживачки центар SFB Transregio са циљем да се истраже могућности примене мономатеријала као што су челик и алуминијум.

Системом покретних тачкастих или линијских ослонаца (у облику рамова), над којима би била остварена контрола померања у зависности од радног режима млина и плазматрона, могла би се остварити и контрола облика у који ће се плоче канала испупчити, а тиме и контролисати струјно поље у каналу. У раду приказани модели фази логике би могли наћи примену у споменутом систему контроле померања ослонаца.

У поглављу 5.2 је на неколико примера приказана уочена зависност издвојеног сопственог вектора од карактеристика нумеричке мреже и типа коришћеног коначног елемента. Ово није био предмет истраживања и нису објашњени узроци који до тога доводе.

## Референце

- [1] P, Stefanović, P. Pavlović, Glavni projekat pilot plazmatronskog postrojenja za stabilizaciju sagorevanja na kotlu bloka 210 MW u TE "Nikola Tesla" - sveska 1. - opšti deo projekta, Beograd-Vinča, novembar 2001, NIV-ITE 184
- [2] P.Lj. Stefanović, P.B. Pavlović, S.Belošević, Z.J.Marković, D.B. Cvetinović, Z.N. Pavlović, N.V. Živković, Numerical simulation of Pulverized Kolubara Lignite Plasma Chemical Gasification, Abstracts of Invited and Contributed papers International Conference on Physics of Low Temperature Plasma PLTP-03, May 11-15, 2003, Kiev Ukraine, pp. 3-27-31-p
- [3] Stefanović P., Pavlović P., Marković Z., Cvetinović D., Pavlović Z., Živković N., Uperedna termička strukturalna analiza dva različita rešenja kanala aerosmeše gorioničkog paketa, Beograd-Vinča, januar 2002, NIV-ITE 413
- [4] Pavle B.Pavlović, Predrag Lj. Stefanović, Zoran J. Marković, Zoran N. Pavlović, Dejan B. Cvetinović, Nikola V. Živković: Termonaponska analiza konstruktivnih rešenja gorioničkog kanala za plazma pripremu aerosmeše na kotlu bloka A1 TENT-A, Procesna tehnika, UDK 621.181:662.933.4 BIBLID 0352-678X Vol.18 No.1 (2002) pp.79-83
- [5] P.Lj. Stefanovic, P.B. Pavlovic, Z.J.Markovic, D.B. Cvetinovic, Z.N. Pavlovic, N.V. Zivkovic, Plasma Coal Gasification Section Thermal Structural Analysis, Proceedings of the International Conference on Physics of Low Temperature Plasma PLTP-03, May 11-15, 2003, Kiev, (2004) Navchalna Knyga, Ukraina, pp. 3-27-31-p
- [6] P. Pavlović, P.Stefanović, D. Cvetinović i dr., Analiza rada gorioničkog kanala sa plazmahemijskom pripremom ugljenog praha za stabilizaciju sagorevanja na kotlu bloka TENT-A1 Obrenovac, Beograd-Vinča, septembar 2009, NIV-ITE 413

[7] Sijerčić M., Belošević S., Stefanović P., Modeling of Pulverized Coal Combustion Stabilization by Means of Plasma Torches, *Thermal Science*, Vol. 9, 2005, No. 2, pp. 57-72, UDC: 662.62:66.088, BIBLID: 0354-9836

[8] П. Стефановић, П. Павловић, Д. Цветиновић, Н. Живковић, П. Шкобаљ, Р. Јовановић, З. Марковић, Ново лабораторијско постројење са вртложним гориоником за плазмену стабилизацију сагоревања угљеног праха у лету, Винча, Април 2010. године, НИВ – ИТЕ 442,

[9] П. Стефановић, П. Павловић, Д. Цветиновић и др., Резултати експерименталног истраживања на лабораторијском прототипу вртложног горионика за плазмену стабилизацију сагоревања угљеног праха у лету, Београд – Винча, Април 2011. године, НИВ – ИТЕ 472

[10] Aleksandar V. Saljnikov, Sagorevanje ugljenog praha u osnosimetričnom turbulentnom strujnom polju, *Doktorska disertacija*, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 1998

[11] Jovanović R., Cvetinović D., Stefanović P., Swiatkowski B.: Turbulent Two-Phase Flow Modeling of Air-Coal Mixture Channels with Single Blade Turbulators, *FME Transactions* (36), pp. 67-74, 2008 (ISSN 1451-2092)

[12] Jovanović R.D., Cvetinović D.B., Stefanović P.LJ, Škobalj P.D., Marković Z.J., Novel Fragmentation Model for Pulverized Coal Particles Gasification in Low Temperature Air Thermal Plasma, *Thermal Science*, vol. 20, Suppl. 1, pp. S207-S221, 2016, DOI: 10.2298/TSCI151222015J, UDC: 662.62:66.088, BIBLID: 0354-9836

[13] Z. J. Marković, P. Lj. Stefanović, D. B. Cvetinović, Z. N. Pavlović, N. V. Živković, M. J. Paprika, Parametarska analiza strujanja vazduha kroz kanal aerosmeše gorioničkog paketa, *Zbornik radova*, 12. Simpozijum termičara Srbije i Crne Gore, Sokobanja, 18-21.10.2005., Sokobanja, Srbija

[14] Z. Marković, P. Stefanović, D. Cvetinović, Fluid-structure interaction plasma coal gasification channel computational analysis, *Proceedings of the CHISA 2006*, 17th International Congress of Chemical and Process Engineering, Summaries 3 –



Hydrodynamic Processes, 27-31 August, Praha, Czech Republic, p1.049, pp. 840-841, ISBN: 80-86059-45-6

[15] Z.Markovic, P. Stefanovic, D. Cvetinovic, Coupled field numerical simulation of thermally loaded plasma coal gasification channels, MECHANICS 2006, Proceedings of The Fifth International Scientific Conference, Rzeszow, Poland, July 2006, pp. 123-130, ISSN 0209-2689

[16] Lubarda, V., Otpornost materijala, Uvod u mehaniku deformabilnog tela, Univerzitet Veljko Vlahović u Titogradu, NIO Univerzitetska riječ, Titograd, 1989.

[17] Jones, Robert M., Buckling of Bars, Plates and Shells, Bull Ridge Publishing, Blacksburg, Virginia, USA, 2006

[18] Wojciech Pietraszkiewicz, Jaroslaw Gorski, Shell Structures: Theory and Applications, Tom 3, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00082-7

[19] Stephen P. Timoshenko, James M. Gere, Theory of Elastic Stability, 1961, McGraw-Hill IBook Company, Inc., Library o Congress Catalog Card Number 59-8568

[20] S. Timoshenko, S. Woinowsky – Krieger, Theory of Plates and Shells, 1959, McGraw-Hill IBook Company, Inc.,

[21] Stanislaw Lukasiewicz, Local Loads in Plates and Shells, Sijthoff & Noordhoff International Publishers B.V., 1979, ISBN 90 286 00 477

[22] Miodrag Sekulović, Metod konačnih elementata, Građevinska knjiga, 1988, Beograd

[23] O.C. Zienkiewicz, The Finite Element Method, 1977, McGraw-Hill Book Company, England, ISBN 0-07-084072-5

[24] ANSYS Release 12.0 Documentation for ANSYS, ANSYS Inc., April 2009

[25] Suhas V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow (Series in Computational Methods in Mechanics and Thermal Sciences), Hemisphere Publishing Corporation, USA, 1980, ISBN 0-07-048740-5

- [26] ANSYS CFX-Solver Theory Guide, Release 12.1, Ansys Inc., Nov. 2009
- [27] Zadeh, L. A., Fuzzy Sets, *Information and Control*, 8, (1965), pp. 338—353
- [28] *The Language of Technical Computing*, MATLAB, Math Works Inc., 2012
- [29] Boley, B. A. and Weiner, J. H., *Theory of Thermal Stresses*, Wiley, New York, 1960.
- [30] Eloy, C., et al., Aeroelastic Instability of Cantilevered Flexible Plates in Uniform Flow, *J. Fluid Mech.*, 611 (2008), pp. 97 - 106, DOI: 10.1017/S002211200800284X
- [31] Gordnier, R.E., Visbal, M.R., Computation of the Aeroelastic Response of a Flexible Delta Wing at High Angles of Attack, *Journal of Fluids and Structures*, 19 (2004), pp. 785–800, doi:10.1016/j.jfluidstructs.2004.04.008
- [32] Farhat, C., et al., Application of a Three-Field Nonlinear Fluid–Structure Formulation to the Prediction of the Aeroelastic Parameters of an F-16 Fighter, *Computers & Fluids* 32 (2003), pp. 3-29
- [33] Benkherouf, T., et al., Efficiency of an Auto-Propelled Flapping Airfoil, *Journal of Fluids and Structures*, 27 (2011), pp. 552–566, doi:10.1016/j.jfluidstructs.2011.03.004
- [34] Ducoin, A., et al., An Experimental and Numerical Study of the Hydroelastic Behaviour of an Hydrofoil in Transient Pitching Motion, *Proceedings, First International Symposium on Marine Propulsors SMP'09 Trondheim, Norway, 2009*
- [35] Münch, C., Ausoni, P., Braun, O., Farhat, M., Avellan, F., Fluid–Structure Coupling for an Oscillating Hydrofoil, *Journal of Fluids and Structures*, 26 (2010), pp. 1018–1033, doi:10.1016/j.jfluidstructs.2010.07.002
- [36] Esmailzadeh M., et al., Three-Dimensional Modelling of Curved Structures Containing and/or Submerged in Fluid, *Finite Elements in Analysis and Design*, 44, (2008), pp. 334 – 345, doi:10.1016/j.finel.2007.11.019

- [37] Glück M., et al., Computation of Fluid–Structure Interaction on Lightweight Structures, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89, (2001), pp. 1351–1368
- [38] 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
- [39] M. Kuntz, F.R. Menter, 2004, Simulation Of Fluid-Structure Interactions In Aeronautical Applications, *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS 2004, Jyväskylä, Finland*
- [40] Attar, P.J., Gordnier, R.E., Aeroelastic Prediction of the Limit Cycle Oscillations of a Cropped Delta Wing, *Journal of Fluids and Structures* 22 (2006), pp. 45–58
- [41] Fairuz. Z. M., et al., Effect of Wing Deformation on the Aerodynamic Performance of Flapping Wings: Fluid-Structure Interaction Approach, *J. Aerosp. Eng.*, (2016), 04016006, DOI: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000548
- [42] Herrick, G. P., Assessing Fan Flutter Stability in Presence of Inlet Distortion Using One-way and Two-way Coupled Methods, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20140016835.pdf>
- [43] Dowell, E.H., Hall, K.C., Modelling of fluid–structure interaction, *Annual Review of Fluid Mechanics* 33, (2001), pp. 445–490
- [44] Frandsen, J.B., Numerical Bridge Deck Studies Using Finite Elements. Part I: Flutter, *Journal of Fluids and Structures*, 19 (2004), pp. 171–191, doi:10.1016/j.jfluidstructs.2003.12.005
- [45] Schumann U., Impacts and Fluid-Structure Interaction in Pressurized Water Reactor Safety Analysis, *Nuclear Engineering and Design*, 69 (1982), pp. 313-326
- [46] Hasnedlová J., et al., Numerical Simulation of Fluid–Structure Interaction of Compressible Flow and Elastic Structure, *Computing*, 95, (2013),1, pp 343-361, DOI: 10.1007/s00607-012-0240-x

- [47] Barone, M.F., Payne, J.L., Methods for Simulation-based Analysis of Fluid-Structure Interaction, Report SAND2005-6573, (2005), Sandia National Laboratories
- [48] Sigrist, J.F., Garreau, S., Dynamic Analysis of Fluid–Structure Interaction Problems With Modal Methods Using Pressure-Based Fluid Finite Elements, *Finite Elements in Analysis and Design*, 43 (2007), pp. 287 – 300, doi:10.1016/j.finel.2006.10.002
- [49] Culler, A. J. and McNamara, J. J., Studies on Fluid-Thermal-Structural Coupling for Aerothermoelasticity in Hypersonic Flow, *AIAA Journal*, 48, (2010), 8, pp. 1721–1738
- [50] Shengze L., et al., Fluid-Thermal-Structure Coupled Analysis of Grid Fins for Hypersonic Flight Vehicle, Proceedings, Coupled Problems 2015, VI International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering, San Servolo, Venice, Italy, (2015), pp. 701-712
- [51] Zhao, X., et al., Coupled Flow-Thermal-Structural Analysis of Hypersonic Aerodynamically Heated Cylindrical Leading Edge, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 5, (2011), 2, pp. 170-179
- [52] Ducoin, A., et al., An Experimental and Numerical Study of the Hydroelastic Behaviour of an Hydrofoil in Transient Pitching Motion, Proceedings, First International Symposium on Marine Propulsors SMP'09 Trondheim, Norway, 2009
- [53] Donea J., et al., *Encyclopedia of Computational Mechanics, Volume 1: Fundamentals*, Chapter 14: Arbitrary Lagrangian–Eulerian Methods, John Wiley & Sons, 2004, Ltd., ISBN: 0-470-84699-2
- [54] Doaré, O., et al., Flutter of an Elastic Plate in a Channel Flow: Confinement and Finite-Size Effects, *J. Fluids Struct.*, 27, (2011), 1, pp. 76–88, doi:10.1016/j.jfluidstructs.2010.09.002

[55] Guo, C.Q., Paidoussis, M.P., Stability of Rectangular Plates With Free Side-Edges in Two-Dimensional Inviscid Channel Flow, *J Appl Mech*, 67, (2000), 1, pp. 171-176, doi: 10.1115/1.321143

[56] Christopher Mark Ostoich, Aerothermal and Aeroelastic Response Prediction of Aerospace Structures in High-Speed Flows Using Direct Numerical Simulation, Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2013

[57] Adam John Culler, Coupled Fluid-Thermal-Structural Modeling and Analysis of Hypersonic Flight Vehicle Structures, Dissertation, The Ohio State University, 2010

[58] Culler, A.J., McNamara, J.J., Fluid-Thermal-Structural Modeling and Analysis of Hypersonic Structures under Combined Loading, 2011, AIAA 2011-1965, 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Denver, Colorado

[59] B.W.Augenstein, E.D. Harris, The National Aerospace Plane (NASP): development Issues for the Follow-on Vehicle, Executive Summary, Published 1993 by RAND, ISBN: 0-8330-1342-4

[60] Victor Birman , Ravinder Chona, Larry W. Byrd, Mark A. Haney, Response of Spatially Tailored Structures to Thermal Loading, *J Eng Math*, (2008), 61, pp. 201–217, DOI 10.1007/s10665-007-9151-9

[61] Kortesis S. and Panagiotopoulos P. D., Neural Networks for Computing in Structural Analysis: Methods and Prospects of Applications, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 36, (1993) 13, pp. 2305-2318, DOI:10.1002/nme.1620361310

[62] Szewczyk, Z. P. and Noor, A. K., A Hybrid Neurocomputing/Numerical Strategy for Nonlinear Structural Analysis, *Computers & Structures* 58, (1996), 4, pp. 661-677, 00457949(95)00178-6

[63] Liu, S.W., et al., Detection of Cracks Using Neural Networks and Computational Mechanics, *Comp. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 191, (2002), pp. 2831-2845

- [64] Baghalian S., et al., Closed - Form Solution for Flow Field in Curved Channels in Comparison with Experimental and Numerical Analyses and Artificial Neural Network, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 6, No. 4, pp. 514-526
- [65] Erdik, T., et al., Artificial Neural Networks for Predicting Maximum Wave Runup on Rubble Mound Structures, *Expert Systems with Applications*, 36, (2009), pp. 6403–6408, doi:10.1016/j.eswa.2008.07.049
- [66] Yari E., et al., Applying the Artificial Neural Network to Estimate the Drag Force for an Autonomous Underwater Vehicle, *Open Journal of Fluid Dynamics*, 4, (2014), pp. 334-346, <http://dx.doi.org/10.4236/ojfd.2014.43025>
- [67] Rao A.V.S., Pratihar D.K., Fuzzy Logic-Based Expert System to Predict the Results of Finite Element Analysis, *Knowledge-Based Systems*, 20, (2007), pp. 37-50, doi: 10.1016/j.knosys.2006.07.004
- [68] Hossain A., et al., Prediction of Aerodynamic Characteristics of an Aircraft Model With and Without Winglet Using Fuzzy Logic Technique, *Aerospace Science and Technology*, 15, (2011), pp. 595–605, doi:10.1016/j.ast.2010.12.003
- [69] Mamdani, E.H., S. Assilian, An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, *International Journal of Man-Machine Studies*, 7, (1975), 1, pp. 1-13
- [70] Erdik, T., Fuzzy Logic Approach to Conventional Rubble Mound Structures Design, *Expert Systems with Applications*, 36, (2009), pp. 4162–4170, doi:10.1016/j.eswa.2008.06.012
- [71] Raja, A.S., Arasu, A.V., Prediction of Cold Start Hydrocarbon Emissions of Air Cooled Two Wheeler Spark Ignition Engines by Simple Fuzzy Logic Simulation, *Thermal Science*, 18, (2014), 1, pp. 179-191, doi: 10.2298/TSCI120726106S, UDC: 662.62:66.088, BIBLID: 0354-9836
- [72] Takagi, T., Sugeno M., Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modelling and Control, *Proceedings of the IEEE Transaction on systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-15, no. 1, (1985), pp. 116-132

- [73] Vassilopoulos, A.P., Bedi, R., Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System in Modelling Fatigue Life of Multidirectional Composite Laminate, *Computational Materials Science*, 43, (2008), pp. 1086-1093, doi: 10.1016/j.commatsci.2008.02.028
- [74] Ćirić, I.T., et al., Air Quality Estimation by Computational Intelligence Methodologies, *Thermal Science*, 16, (2012), Suppl. 2, pp. S493-S504, doi: 10.2298/TSCII20503186C, UDC: 662.62:66.088, BIBLID: 0354-9836
- [75] Saeed R.A., Galybin A.N., Popov V, 3D Fluid–Structure Modelling and Vibration Analysis for Fault Diagnosis of Francis Turbine Using Multiple ANN and Multiple ANFIS, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 34, (2013), p.p. 259–276, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2012.08.004>
- [76] Wael R. Abdul-Majeed, Muhsin J. Jweeg, Adnan N. Jameel, Thermal Buckling of Rectangular Plates With Different Temperature Distribution Using Strain Energy Method, *Journal of Engineering*, 2011, Number 5, Volume 17, pp. 1047-1065
- [77] Earl A. Thornton, *Thermal Structures for Aerospace Applications*, AIAA Education Series, J.S.Przemieniecki, Series Editor-in-Chief, 1996, AIAA, ISBN 1-56347-190-6, pp. 479
- [78] Hui Chen, Lawrence N. Virgin, Finite element analysis of post-buckling dynamics in plates—Part I: An asymptotic approach, *International Journal of Solids and Structures* 43, 2006, pp. 3983–4007, doi:10.1016/j.ijsolstr.2005.04.036
- [79] Hui Chen, Lawrence N. Virgin, Finite element analysis of post-buckling dynamics in plates. Part II: A non-stationary analysis, *International Journal of Solids and Structures* 43, 2006, pp. 4008–4027, doi:10.1016/j.ijsolstr.2005.04.037
- [80] Lawrence N. Virgin, *Vibration of Axially Loaded Structures*, Cambridge University Press, 2007, ISBN 978-0-521-88042-8
- [81] Tomasz Kubiak, *Static and Dynamic Buckling of Thin– Walled Plate Structures*, DOI 10.1007/978-3-319-00654-3\_1, Springer International Publishing Switzerland 2013, ISBN 987-3-319-00654-3, Library of Congress Control Number: 2013939826

- [82] Menter, F.R., Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Application, *AIAA Journal* 32 (1994), 8, pp. 1598–1605
- [83] Bardina, J.E., et al., Turbulence Modeling, Validation, Testing and Development, NASA Technical Memorandum 110446, 1997
- [84] Wilcox, D., Comparison of Two-Equation Turbulence Models for Boundary Layers With Pressure Gradient, *AIAA Journal* 31, (1993), 8, pp. 1414–1421
- [85] William L. Ko, Thermal Buckling Analysis of Rectangular Panels Subjected to Humped Temperature Profile Heating, NASA/TP-2004-212041, NASA Dryden Flight Research Center Edwards, California, 2004
- [86] By Myron L. Gossard, Paul Seide, and William M. Roberts, Thermal Buckling of Plates, National Advisory Committee for Aeronautics, TECHNICAL NOTE 2771, 1952
- [87] H. Chen, L.N. Virgin, Dynamic Analysis of Modal Shifting and Mode Jumping in Thermally Buckled Plates, *Journal of Sound and Vibration*, 278 (2004), pp 233–256, doi:10.1016/j.jsv.2003.10.054
- [88] Brent A. Miller, Jack J. McNamara, Adam J. Culler and S. Michael Spottswood, The Impact of Flow Induced Loads on Snap-Through Behavior of Acoustically Excited, Thermally Buckled Panels, AIAA 2010-2540, 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2010, Orlando, Florida
- [89] Hyghes, T.J.R., Numerical Implementation of Constitutive Models: Rate-Independent Deviatoric Plasticity, Theoretical foundation for Large-Scale computations for Nonlinear Material Behavior, Netherlands, (1984)
- [90] Ramji Kamakoti, Wei Shyy, Fluid–Structure Interaction for Aeroelastic Applications, *Progress in Aerospace Sciences*, 40 (2004), pp. 535–558, doi:10.1016/j.paerosci.2005.01.001
- [91] M. B. Giles. Stability Analysis of Numerical Interface Conditions in Fluid-Structure Thermal Analysis, *Int. J. Num. Methods. Fluids*, 25(8):421–436, 1997.



- [92] Brent Adam Miller, Loosely Coupled Time Integration of Fluid-Thermal-Structural Interactions in Hypersonic Flows, Dissertation, The Ohio State University, 2015
- [93] Norman E Knight, Michael P. Nemeth, Stability Analysis of Plates and Shells, A Collection of Papers in Honor of Dr. Manuel Stein, NASA / CP-1998-206280, Compilation of papers presented at special sessions honoring Dr. Manuel Stein during the 38th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Kissimmee, Florida, 1997, Langley Research Center Hampton, Virginia
- [94] Bo Häggblad, Klaus-Jürgen Bathe, Specifications of Boundary Conditions for Reissner/Mindlin Plate Bending Finite Elements, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1990, John Wiley & Sons Ltd., Vol. 30, pp. 981-1011
- [95] S. Timoshenko, D. H. Young, Vibration Problems in Engineering, 3rd Edition, D. Van Nostrand Co., Inc., New York, NY, 1955
- [96] Roger G. Grimes, John G. Lewis and Horst D. Simon, A Shifted Block Lanczos Algorithm for Solving Sparse Symmetric Generalized Eigenproblems, Siam J. Matrix Anal. Appl. Vol. 15, No 1, pp. 000-000, January 1994
- [97] Vinayak Ranjan and M.K.Ghosh, Transverse Vibration of Spinning Disk With Attached Distributed Patch and Discrete Point Masses Using Finite Element Analysis, International Journal of Engineering, Science and Technology, vol. 1, No. 1, 2009, pp. 74-89
- [98] S. Paik, S.S. Gupta, R.C. Batra, Localization of Buckling Modes in Plates and Laminates, Composite Structures 120, 2015, pp. 79–89, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.09.035>
- [99] Sherif Saleh Safar Aly, Buckling Assessment of Axially Loaded Cylindrical Shells With Random Imperfections, 1995, Retrospective Theses and Dissertations, Paper 10977, Iowa State University, <http://lib.dr.iastate.edu/rtd>

- [100] J. Arbocz, M. Potier-Ferry, J. Singer, V. Tvergaard, Buckling and Post-Buckling, Lectur Notes in Physics 288, Springer Verlag Berlin-Heidelberg-New York, ISBN 3-540-18312-4
- [101] Johann Arbocz, The Effect of General Imperfections on the Buckling of Cylindrical Shell, Phd Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1968, <http://resolver.caltech.edu/CaltechETD:etd-11292005-080202>
- [102] Adam J. Sadowski, J. Michael Rotter, On the Relationship Between Mesh and Stress Field Orientations in Linear Stability Analyses of Thin Plates and Shells, Finite Elements in Analysis and Design, Volume 73, 1 October 2013, Pages 42–54, doi:10.1016/j.finel.2013.05.004
- [103] Samuel Raja, A., Valan Arasu, A., 2014,,: Prediction of Cold Start Hydrocarbon Emissions of Air Cooled Two Wheeler Spark Ignition Engines by Simple Fuzzy Logic Simulation, Thermal Science: Vol. 18, No. 1, pp. 179-191, DOI: 10.2298/TSCI120726106S, UDC: 662.62:66.088, BIBLID: 0354-9836
- [104] Marco Gigliotti, Michael R. Wisnom, Kevin D. Potter, Loss of Bifurcation and Multiple Shapes of Thin [0/90] Unsymmetric Composite Plates Subject to Thermal Stress, Composites Science and Technology, 64, 2004, pp. 109–128, doi:10.1016/S0266-3538(03)00213-6
- [105] B. Roe, A. Haselbacher, P. H. Geubelle, Stability of fluid–structure thermal simulations on moving grids, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 54, Issue 9, 2007, pp. 1097–1117, DOI: 10.1002/flid.1416
- [106] R. K. Jaiman, X. Jiao, P. H. Geubelle, and E. Loth, Assessment of Conservative Load Transfer for Fluid–Solid Interface With Non-Matching Meshes, Int. J. Numer. Meth. Engng, 64, 2005, pp. 2014–2038, DOI: 10.1002/nme.1434
- [107] R. K. Jaiman, X. Jiao, P. H. Geubelle, and E. Loth, Conservative load transfer along curved fluid–solid interface with non-matching meshes, Journal of Computational Physics, 218, 2006, pp. 372–397, doi:10.1016/j.jcp.2006.02.016

[108] Launder, B.E., Spalding, D.B., The Numerical Computation of Turbulent Flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 3, (1974), 2, pp. 269–289

[109] Raw, M.J., 1996, Robustness of Coupled Algebraic Multigrid for the Navier-Stokes Equations, AIAA 96-0297, 34th Aerospace and Sciences Meeting & Exhibit, January 15-18 1996, Reno, NV.

[110] A.K. Slone, K. Pericleous, C. Bailey, M. Cross, C. Bennett, A Finite Volume Unstructured Mesh Approach to Dynamic Fluid–Structure Interaction: an Assessment of The Challenge of Predicting the Onset of Flutter, *Applied Mathematical Modelling* 28, 2004, pp. 211–239, doi:10.1016/S0307-904X(03)00142-2

[111] I. Demirdzic and M. Peric., Space conservation law in finite volume calculations of fluid flow. *Int. J. Num. Methods in Fluids*, 8, (1998), pp1037-1050

[112] Donea, J., Giuliani, S., Halleux, J., An Arbitrary Lagrangian–Eulerian Finite Element Method for Transient Dynamic Fluid–Structure Interactions, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 33, (1982), pp. 689–723

[113] S. Timoshenko, D.H. Young, W. Weaver Jr., *Vibration Problems in Engineering*, Forth Edition, John Wiley & Sons, 1974

[114] Radenac E., Gressier J., Millan P., Methodology of Numerical Coupling for Transient Conjugate Heat Transfer, *Computers & Fluids*, vol. 100, pp. 95–107, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.05.006>, 2014

## Прилог

Приказани су неки од добијених резултата потпуно спрегнутих нумеричких прорачуна са двосмерним преносом утицаја за параметарске моделе приказаних карактеристика коришћењем софтверских пакета ANSYS и ANSYS CFX ( т. 5.3).

Коришћене ознаке имају следеће значење:

- 1) **VaaFbbTcccdTeee** – дефиниција нумеричког модела, при чему Vaa означава вредност улазне брзине  $V_{ul}$  [m/s] коришћене у прорачуну (т. 4.2), Fbb – фактор густине нумеричке мреже  $F_{gm}^S$  [-], Tccc – задата вредност температуре унутрашње површине зида плоче  $T_{un}$  [°C], dTeee – разлика температура унутрашње ( $T_{un}$ ) и спољашње ( $T_{sp}$ ) површине плоче ( $T_{un} - T_{sp}$ ),
- 2) **Случај** – ознака нумеричког модела чији су резултати приказани,
- 3) дијаграм у горњем десном углу представља прорачунати положај чворова деформисане структуре који се налазе у равни симетрије,
- 4)  $P_{ul} - P_{iz}$  [Pa] – пад статичког притиска низ канал израчунат као разлика статичких притисака на улазу и излазу из канала, при чему је статички притисак у посматраном пресеку одређен као усредњен према  $P_m = \Sigma(mP)/\Sigma m$ , где је  $P$  статички притисак а  $m$  локални масени проток кроз коначну запремину. Сумирање се врши и односи на чвор коначне запремине која се налази на посматраној површини (улаз или излаз) за коју се врши усредњавање. Масени проток се добија сумирањем доприноса од суседних тачака интеграције [26],
- 5) **ДП** – промена површине попречног пресека у којем се појављује највећа вредност локалне брзине, израчунато као  $ДП = A_{def}/A_{ned} = 100 \cdot A_{def} / 0,1599$  [%], при чему је  $A_{def}$  – површина деформисаног пресека струјног домена где се појављује највећа вредност брзине, приказано као сива површина на слици деформисаног струјног домена,  $A_{ned}$  – површина недеформисаног пресека,

- 6)  $V_{\max}$  [m/s] – максимална вредност брзине у струјном домену након деформације,
- 7)  $w_{\max}$  [m] (ANSYS / CFX) – максимално померање чворова нумеричке мреже структуралног (ANSYS) и струјног домена (CFX) у правцу +z – осе,
- 8)  $w_{\min}$  [m] (ANSYS / CFX) – максимално померање чворова нумеричке мреже структуралног (ANSYS) и струјног домена (CFX) у правцу -z – осе,
- 9)  $P_{\min}$  [Pa] – најмања вредност статичког притиска у струјном домену, која одговара највећој вредности локалне брзине,
- 10)  $\sigma_{VM \max/min}$  [N/m<sup>2</sup>] – максимална / минимална вредност оствареног напона у структури канала,
- 11) приказани су деформисани модели коначних елемената (слика лево) и коначних запремина (слика десно) са приказом расподеле померања чворова нумеричких мрежа [m],  $w$  – померања у правцу z-осе,  $v$  – померања у правцу y-осе,
- 12) **FA** (max / min) (*Face Angle*) [°]: минимални и максимални угао који заклапају ивице сваке од бочних страница контролне запремине који додирују чвор, мора бити  $> 10^0$  и  $< 170^0$ . Овај однос је једно од мерила ортогоналности нумеричке мреже. Вредности ван дозвољеног опсега утичу на повећање грешке дискретизације, што доводи до лошије конвергенције или чак довергенције нумеричког прорачуна,
- 13) **ELR** (max / min) (*Edge Length Ratio*) [-]: највећи однос најдуже и најкраће ивице контролне запремине за сваку од контролних запремина које додирују посматрани чвор; треба да буде  $< 10$ . Овај параметар указује на ниво деформисаности нумеричке мреже у правцу оса контролне запремине. Веће вредности уносе грешке заокруживања отежавајући конвергенцију решавања система дискретизованих једначина,
- 14) **EVR** (max / min) (*Element Volume Ratio*) [-]: однос запремина највеће и најмање контролне запремине које се налазе око чвора, треба да буде  $< 20$ . Овај параметар представља мерило експанзије мреже, чије повећање утиче на повећање грешке дискретизације по времену,
- 15) **БЧМ** - број чворова мреже коначних запремина,
- 16) **БКЗ** - број контролних запремина у струјном домену,

- 17) **БХ** - број хексаедралних елемената у струјном домену,
- 18) **БЕЛ** – број коначних елемената у структуралном домену,
- 19)  $F_{gm}^S$  – фактор густине нумеричке мреже структуралног домена,
- 20)  $F_{nm}^F$  - фактор густине нумеричке мреже струјног домена,
- 21) "**Momentum and mass**" – дијаграм конвергенције биланса количине кретања и масе,
- 22) "**ANSYS Field Solver (Structural)**" – дијаграм конвергенције нумеричког прорачуна померања, сила и момената у чворовима,
- 23) "**ANSYS Interface Loads**" – дијаграм конвергенције нумеричког прорачуна померања и сила у чворовима на додирној површини нумеричког домена структуре и флуида.

Табела III: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 10m/s$

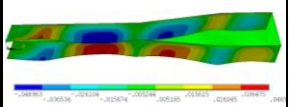
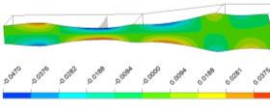
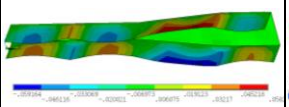
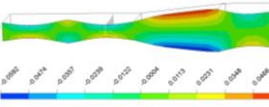
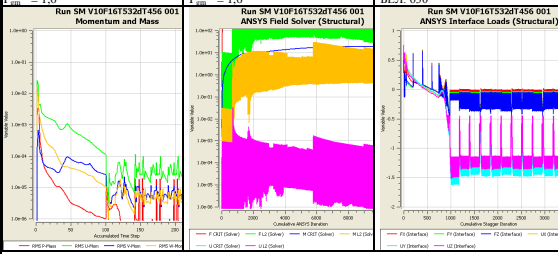
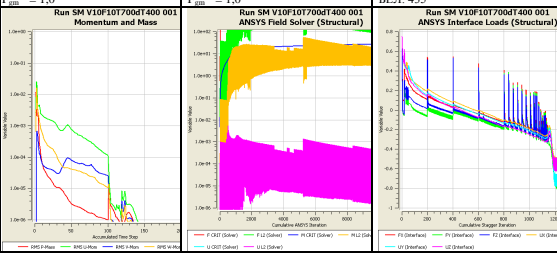
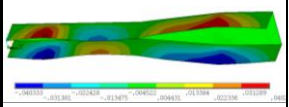
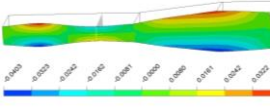
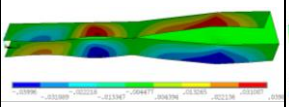
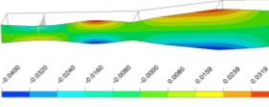
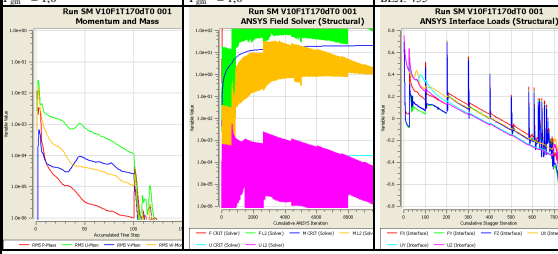
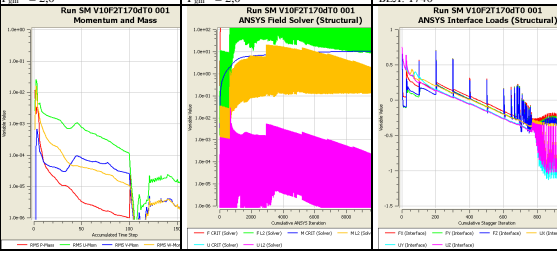
<b>V10F15T372dT54</b> Случај: <b>1001</b>			
$P_{st} - P_{st}$ [Pa]	-16.9327		
ДП [%]	88.451		
$u_{max}$ [m/s]	13.6899		
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.064019 / 0.0640195		
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.054505 / -0.0545054		
$P_{min}$ [Pa]	-56.8517		
$\sigma_{tot\ Mass}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	0.292E+09 / 0.211E+08		
FA (max / min) [°]	67.5317	113.239	
ELR (max / min) [-]	1.01215	3.4949	
EVR (max / min) [-]	1	2.968	
BHM: 3096	БК3: 2352	БХ: 2352	БЕЛ: 1056
$F_{in}^S = 1.8$	$F_{in}^S = 1.8$		
<b>V10F18T243dT186</b> Случај: <b>1002</b>			
$P_{st} - P_{st}$ [Pa]	-22.6042		
ДП [%]	82.1306		
$u_{max}$ [m/s]	13.727		
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.033641 / 0.0336407		
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.03372 / -0.0337204		
$P_{min}$ [Pa]	-61.4084		
$\sigma_{tot\ Mass}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	0.243E+09 / 0.330E+08		
FA (max / min) [°]	77.5292	101.986	
ELR (max / min) [-]	1.08521	3.15336	
EVR (max / min) [-]	1	2.12788	
BHM: 4590	БК3: 3600	БХ: 3600	БЕЛ: 1404
$F_{in}^S = 1.8$	$F_{in}^S = 1.8$		
<b>V10F12T407dT380</b> Случај: <b>1003</b>			
$P_{st} - P_{st}$ [Pa]	-27.0864		
ДП [%]	77.6208		
$u_{max}$ [m/s]	14.4303		
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.040354 / 0.0403536		
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.0404 / -0.0403995		
$P_{min}$ [Pa]	-79.3847		
$\sigma_{tot\ Mass}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	0.249E+09 / 0.570E+08		
FA (max / min) [°]	75.5569	103.384	
ELR (max / min) [-]	1.13887	2.48704	
EVR (max / min) [-]	1	1.34769	
BHM: 1225	БК3: 816	БХ: 816	БЕЛ: 630
$F_{in}^S = 1.2$	$F_{in}^S = 1.2$		
<b>V10F14T494dT362</b> Случај: <b>1004</b>			
$P_{st} - P_{st}$ [Pa]	-25.8274		
ДП [%]	73.0129		
$u_{max}$ [m/s]	15.2843		
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.049064 / 0.0490644		
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.049111 / -0.0491105		
$P_{min}$ [Pa]	-95.9355		
$\sigma_{tot\ Mass}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	0.248E+09 / 0.229E+08		
FA (max / min) [°]	71.0109	114.709	
ELR (max / min) [-]	1.00538	3.4742	
EVR (max / min) [-]	1	2.00127	
BHM: 1920	БК3: 1365	БХ: 1365	БЕЛ: 861
$F_{in}^S = 1.4$	$F_{in}^S = 1.4$		

Табела III – наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 10m/s$

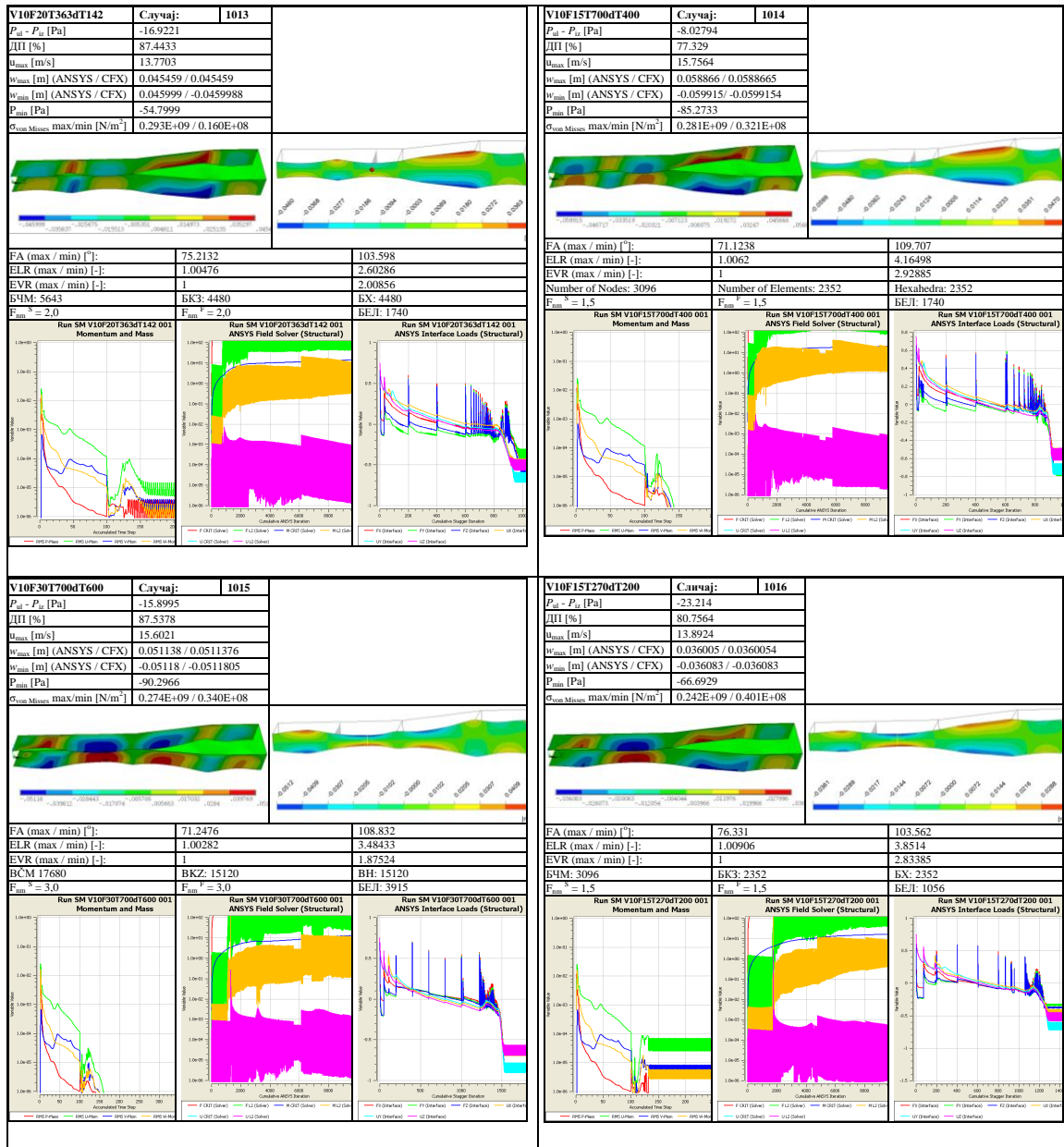
<b>V10F171573d1507</b> Случај: <b>1005</b>		<b>V10F14T648d1500</b> Случај: <b>1006</b>	
$P_{ul} - P_{cl}$ [Pa]	-10.9648	$P_{ul} - P_{cl}$ [Pa]	-23.6418
ДП [%]	80.5875	ДП [%]	84.7755
$u_{max}$ [m/s]	14.6177	$u_{max}$ [m/s]	15.8532
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.040299 / 0.0402987	$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.054159 / 0.0541586
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.040397 / -0.0403969	$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.054202 / -0.0542021
$P_{min}$ [Pa]	-65.1444	$P_{min}$ [Pa]	-105.349
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	0.260E+09 / 0.299E+08	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	0.254E+09 / 0.278E+08
FA (max / min) [°]	73.8758	FA (max / min) [°]	70.2857
ELR (max / min) [-]	1.03689	ELR (max / min) [-]	1.02415
EVR (max / min) [-]	1	EVR (max / min) [-]	1
BМ: 3920	БК3: 3024	BМ: 1920	БК3: 1365
$F_{in}^S = 1.7$	$F_{in}^I = 1.7$	$F_{in}^S = 1.4$	$F_{in}^I = 1.4$
<b>V10F181723d1617</b> Случај: <b>1007</b>		<b>V12F121447d1263</b> Случај: <b>1008</b>	
$P_{ul} - P_{cl}$ [Pa]	-18.1944	$P_{ul} - P_{cl}$ [Pa]	-26.9272
ДП [%]	86.576	ДП [%]	74.1697
$u_{max}$ [m/s]	15.7278	$u_{max}$ [m/s]	15.1731
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.052666 / 0.0526657	$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.047189 / 0.0471889
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.052709 / -0.0527086	$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.047258 / -0.0472578
$P_{min}$ [Pa]	-96.1094	$P_{min}$ [Pa]	-92.5668
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	0.265E+09 / 0.317E+08	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	0.260E+09 / 0.144E+08
FA (max / min) [°]	72.1986	FA (max / min) [°]	74.866
ELR (max / min) [-]	1.04007	ELR (max / min) [-]	1.11566
EVR (max / min) [-]	1	EVR (max / min) [-]	1
BМ: 4590	БК3: 3600	BМ: 1225	БК3: 816
$F_{in}^S = 1.8$	$F_{in}^I = 1.8$	$F_{in}^S = 1.2$	$F_{in}^I = 1.2$



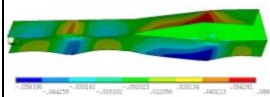
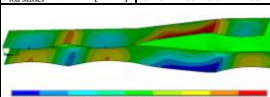
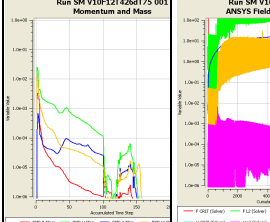
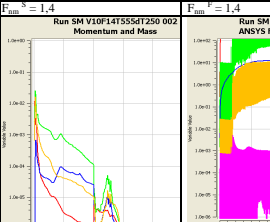
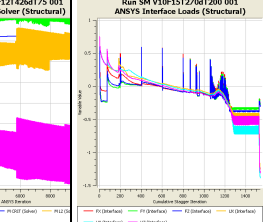
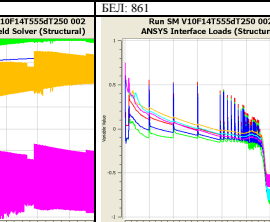
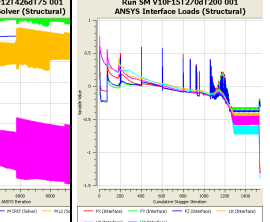
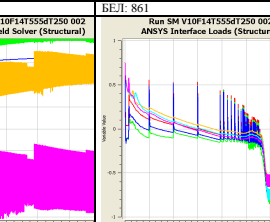
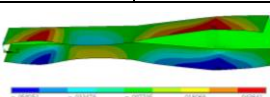
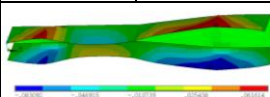
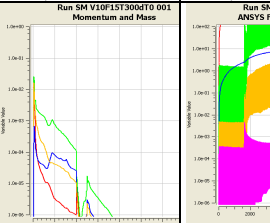
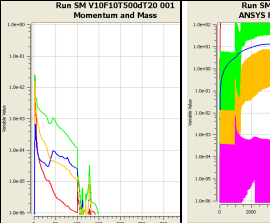
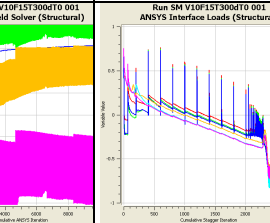
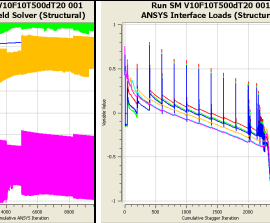
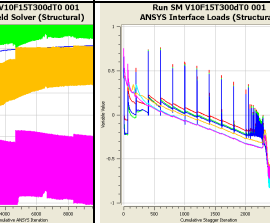
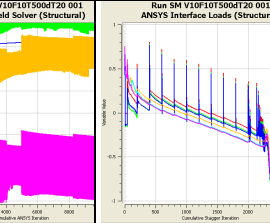
Табела III – наставкак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 10m/s$

<b>V10F16T532dT456</b> Случај: <b>1009</b> $P_{ul} - P_{le}$ [Pa]    -19.6393 $\Delta H$ [%]    73.7216 $u_{max}$ [m/s]    15.0537 $w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)    0.046904 / 0.0469044 $w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)    -0.046963 / -0.0469634 $P_{min}$ [Pa]    -84.8211 $\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]    0.255E+09 / 0.265E+08	<b>V10F10T700dT400</b> Случај: <b>1010</b> $P_{ul} - P_{le}$ [Pa]    -13.0748 $\Delta H$ [%]    78.4122 $u_{max}$ [m/s]    15.4521 $w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)    0.058266 / 0.0582661 $w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)    -0.059164 / -0.0591642 $P_{min}$ [Pa]    -83.8133 $\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]    0.254E+09 / 0.359E+08
 	 
<b>FA (max / min) [°]:</b> 74.2098    105.478 <b>ELR (max / min) [-]:</b> 1.07293    4.27799 <b>EVR (max / min) [-]:</b> 1    2.86012 <b>B4M: 3312</b> БК3: 2520    БХ: 2520 $F_{in}^S = 1.6$ $F_{in}^V = 1.6$ БЕЈ: 630	<b>FA (max / min) [°]:</b> 72.4153    106.614 <b>ELR (max / min) [-]:</b> 1.00361    3.04551 <b>EVR (max / min) [-]:</b> 1    2.02013 <b>B4M: 870</b> БК3: 560    БХ: 560 $F_{in}^S = 1.0$ $F_{in}^V = 1.0$ БЕЈ: 435
	
<b>V10F10T170dT0</b> Случај: <b>1011</b> $P_{ul} - P_{le}$ [Pa]    -34.1395 $\Delta H$ [%]    88.0474 $u_{max}$ [m/s]    11.7924 $w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)    0.040242 / 0.0402422 $w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)    -0.040333 / -0.0403332 $P_{min}$ [Pa]    -62.812417 $\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]    0.249E+09 / 0.261E+08	<b>V10F20T170dT0</b> Случај: <b>1012</b> $P_{ul} - P_{le}$ [Pa]    -30.8579 $\Delta H$ [%]    88.1155 $u_{max}$ [m/s]    12.3627 $w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)    0.039877 / 0.0398775 $w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)    -0.03996 / -0.0399597 $P_{min}$ [Pa]    -57.628 $\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]    0.271E+09 / 0.141E+08
 	 
<b>FA (max / min) [°]:</b> 78.947    102.93 <b>ELR (max / min) [-]:</b> 1.00647    2.58746 <b>EVR (max / min) [-]:</b> 1    1.87771 <b>B4M: 870</b> БК3: 560    БХ: 560 $F_{in}^S = 1.0$ $F_{in}^V = 1.0$ БЕЈ: 435	<b>FA (max / min) [°]:</b> 77.9639    103.095 <b>ELR (max / min) [-]:</b> 1.00613    2.59646 <b>EVR (max / min) [-]:</b> 1    1.89537 <b>B4M: 5643</b> БК3: 4480    БХ: 4480 $F_{in}^S = 2.0$ $F_{in}^V = 2.0$ БЕЈ: 1740
	

Табела III – наставкак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 10m/s$



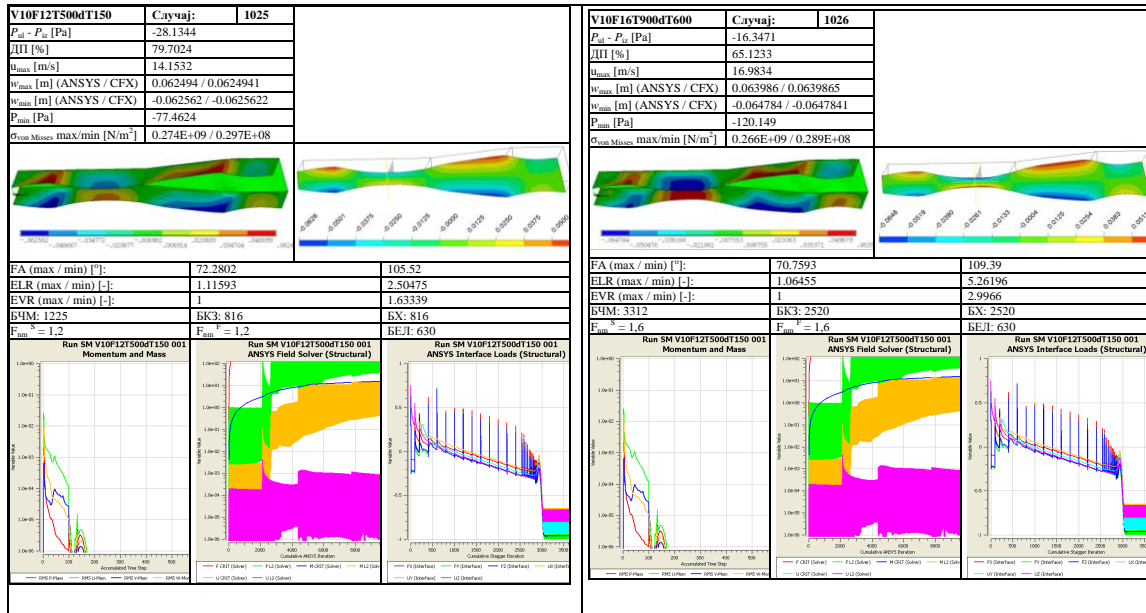
Табела III – наставкак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 10m/s$

<b>V10F12T426d175</b> Случај: <b>1017</b>			<b>V10F14T555d1250</b> Случај: <b>1018</b>		
$P_{ul} - P_e$ [Pa]      -21.0895			$P_{ul} - P_e$ [Pa]      -17.3673		
$\beta$ [%]      87.7755			$\beta$ [%]      82.9829		
$w_{max}$ [m/s]      13.7921			$w_{max}$ [m/s]      14.4869		
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)      0.068371 / 0.0683708			$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)      0.056693 / 0.0566934		
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)      -0.058338 / -0.0583382			$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)      -0.057569 / -0.0575689		
$P_{min}$ [Pa]      -64.2737			$P_{min}$ [Pa]      -70.2482		
$\sigma_{von Mises, max/min}$ [N/m <sup>2</sup> ]      0.277E+09 / 0.196E+08			$\sigma_{von Mises, max/min}$ [N/m <sup>2</sup> ]      0.282E+09 / 0.544E+08		
					
$FA$ (max / min) [°]:      70.8624      107.401			$FA$ (max / min) [°]:      70.0944      121.372		
$ELR$ (max / min) [-]:      1.14619      2.33531			$ELR$ (max / min) [-]:      1.00568      2.88214		
$EVR$ (max / min) [-]:      1      1.60536			$EVR$ (max / min) [-]:      1      1.98758		
$BHM$ : 1225 $BK3$ : 816 $BX$ : 816			$BHM$ : 1920 $BK3$ : 1365 $BX$ : 1365		
$F_{min} = 1.2$ $F_{min} = 1.2$ $BEL$ : 630			$F_{min} = 1.4$ $F_{min} = 1.4$ $BEL$ : 861		
					
					
					
<b>V10F15T300d10</b> Случај: <b>1019</b>			<b>V10F10T500d120</b> Случај: <b>1020</b>		
$P_{ul} - P_e$ [Pa]      -26.1983			$P_{ul} - P_e$ [Pa]      -28.2025		
$\beta$ [%]      85.9145			$\beta$ [%]      82.9623		
$w_{max}$ [m/s]      13.1239			$w_{max}$ [m/s]      13.783		
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)      0.056727 / 0.0567273			$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)      0.056727 / 0.0797027		
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)      -0.059251 / -0.0592513			$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)      -0.059251 / -0.0830919		
$P_{min}$ [Pa]      -58.6756			$P_{min}$ [Pa]      -72.2296		
$\sigma_{von Mises, max/min}$ [N/m <sup>2</sup> ]      0.285E+09 / 0.206E+08			$\sigma_{von Mises, max/min}$ [N/m <sup>2</sup> ]      0.259E+09 / 0.356E+08		
					
$FA$ (max / min) [°]:      68.6759      111.959			$FA$ (max / min) [°]:      66.6914      110.601		
$ELR$ (max / min) [-]:      1.01113      3.66871			$ELR$ (max / min) [-]:      1.0025      2.96601		
$EVR$ (max / min) [-]:      1      2.9639			$EVR$ (max / min) [-]:      1      2.25222		
$BHM$ : 3096 $BK3$ : 2352 $BX$ : 2352			$BHM$ : 870 $BK3$ : 560 $BX$ : 560		
$F_{min} = 1.5$ $F_{min} = 1.5$ $BEL$ : 1056			$F_{min} = 1.0$ $F_{min} = 1.0$ $BEL$ : 435		
					
					
					

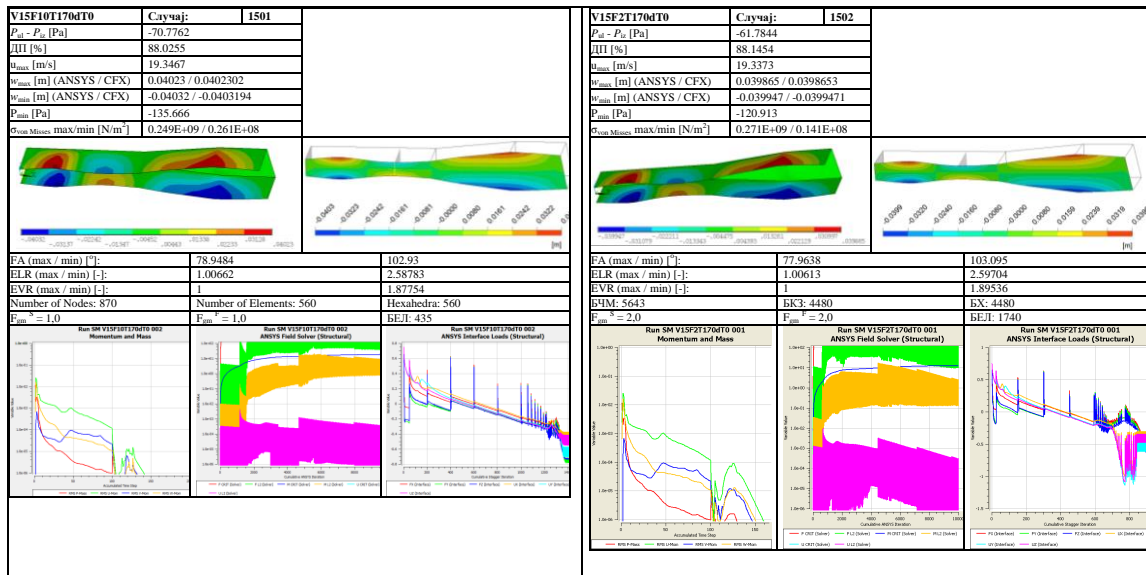
Табела III – наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 10m/s$

<b>V10F14T300dT200</b> Случај:    1021		<b>V10F13T500dT300</b> Случај:    1022	
$P_a - P_s$ [Pa]	-27.638	$P_a - P_s$ [Pa]	-25.9039
$\Delta H$ [%]	79.0013	$\Delta H$ [%]	72.208
$u_{max}$ [m/s]	14.1784	$u_{max}$ [m/s]	15.4071
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.038927 / 0.0389269	$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.050557 / 0.0505571
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.039006 / -0.0390056	$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.050613 / -0.050613
$P_{min}$ [Pa]	-75.968	$P_{min}$ [Pa]	-98.8464
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	0.250E+09 / 0.308E+08	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	0.264E+09 / 0.492E+08
FA (max / min) [°]	71.9838	FA (max / min) [°]	71.0335
ELR (max / min) [-]	1.01779	ELR (max / min) [-]	1.01017
EVR (max / min) [-]	1	EVR (max / min) [-]	1
BHM: 1554	BK3: 1080	BHM: 1554	BK3: 1080
Number of Nodes: 1920	Number of Elements: 1365	Number of Nodes: 1920	Number of Elements: 1365
$F_{in}^* = 1.4$	$F_{in}^* = 1.4$	$F_{in}^* = 1.3$	$F_{in}^* = 1.3$
<b>V10F13T700dT500</b> Случај:    1023		<b>V10F12T750dT300</b> Случај:    1024	
$P_a - P_s$ [Pa]	-23.4962	$P_a - P_s$ [Pa]	-16.4165
$\Delta H$ [%]	67.6935	$\Delta H$ [%]	80.6662
$u_{max}$ [m/s]	16.4165	$u_{max}$ [m/s]	15.1984
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.057396 / 0.0573958	$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.069209 / 0.0692087
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.057427 / -0.0574267	$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.070045 / -0.070045
$P_{min}$ [Pa]	-116.449	$P_{min}$ [Pa]	-81.8021
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	0.251E+09 / 0.184E+08	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	0.267E+09 / 0.311E+08
FA (max / min) [°]	70.3896	FA (max / min) [°]	69.1494
ELR (max / min) [-]	1.0255	ELR (max / min) [-]	1.06215
EVR (max / min) [-]	1	EVR (max / min) [-]	1
BHM: 1554	BK3: 1080	BHM: 1225	BK3: 816
Number of Nodes: 1920	Number of Elements: 1365	Number of Nodes: 1920	Number of Elements: 1365
$F_{in}^* = 1.3$	$F_{in}^* = 1.3$	$F_{in}^* = 1.2$	$F_{in}^* = 1.2$

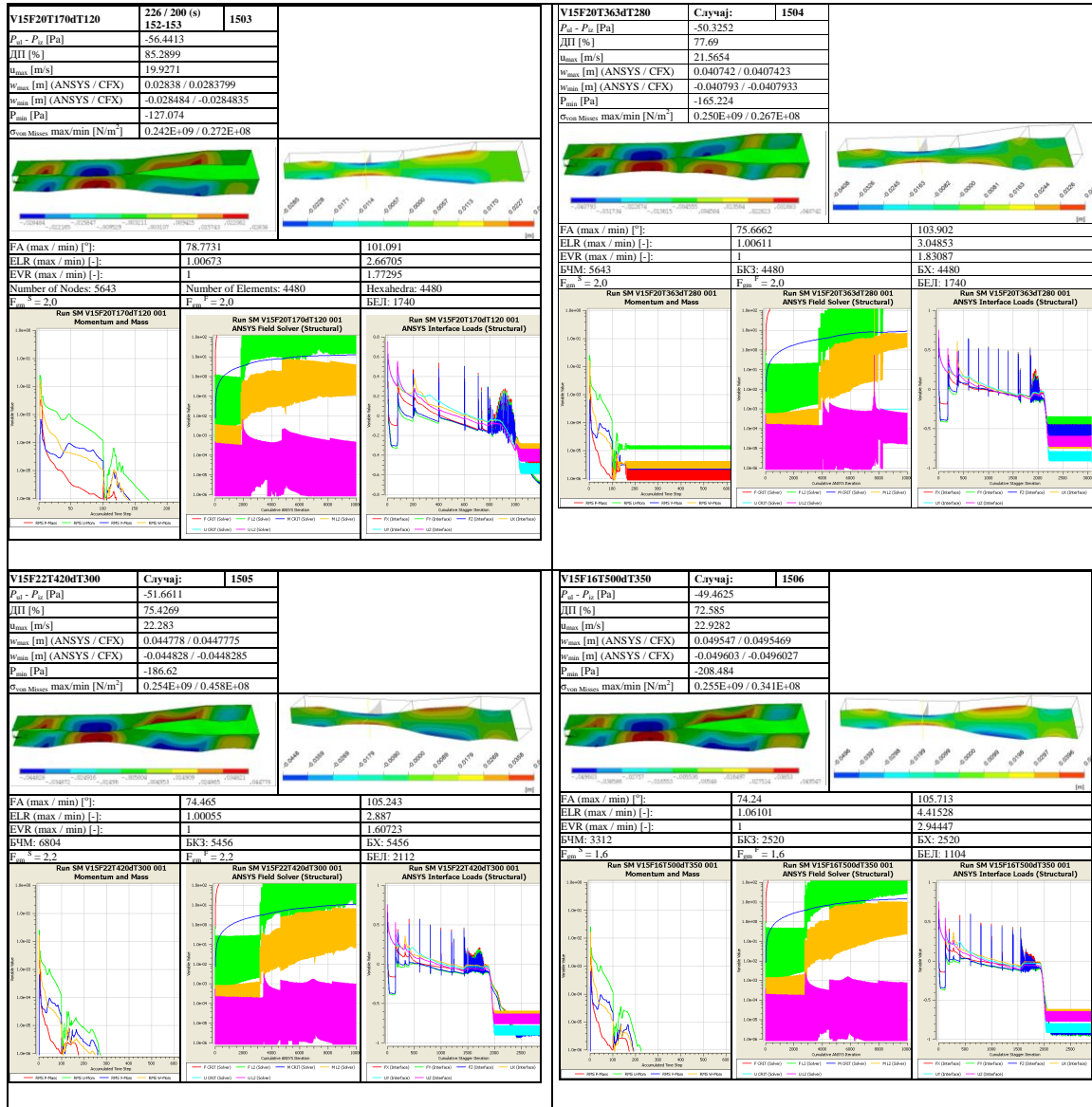
Табела П1 - наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 10m/s$



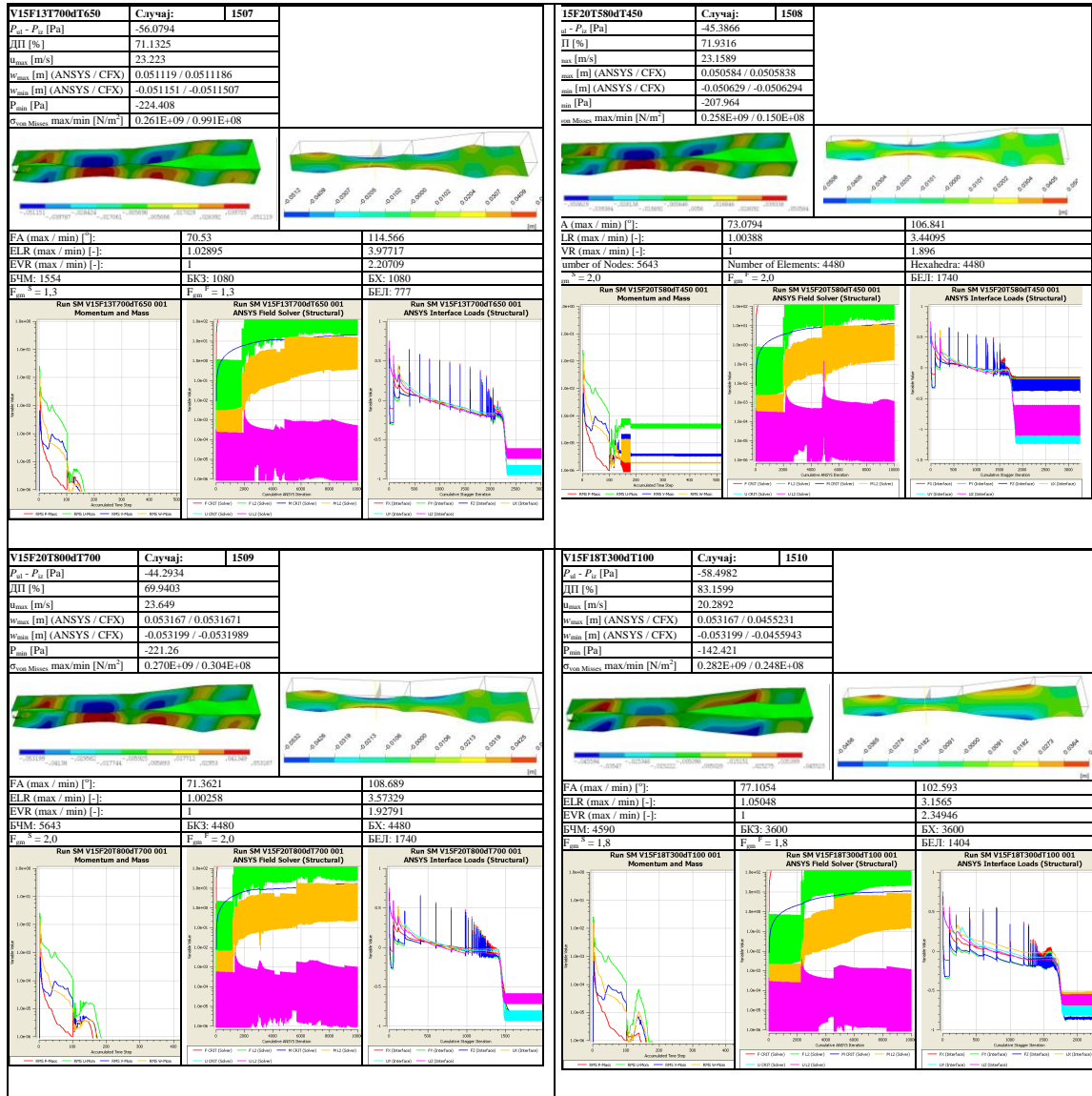
Табела П2: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 15m/s$



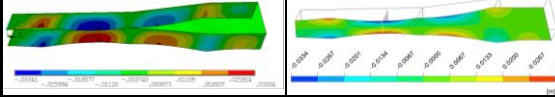
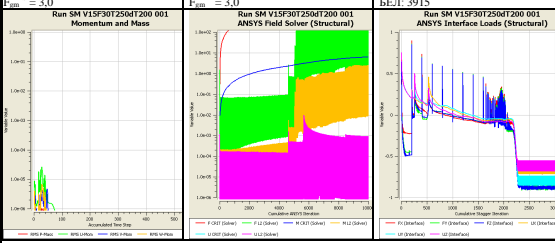
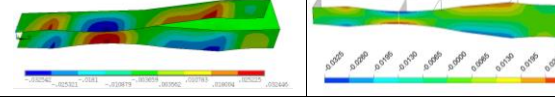
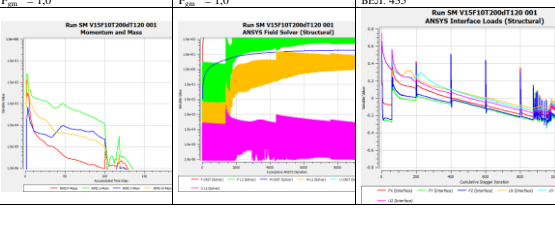
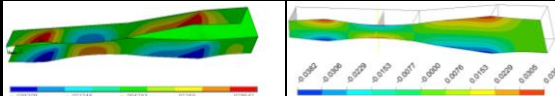
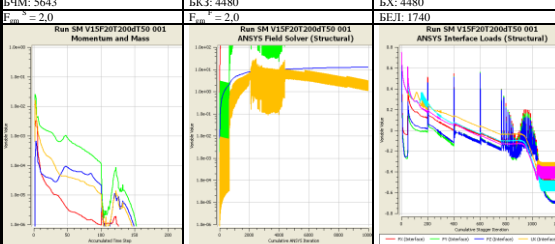
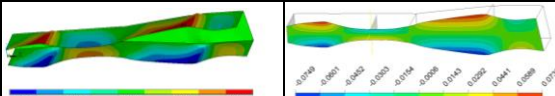
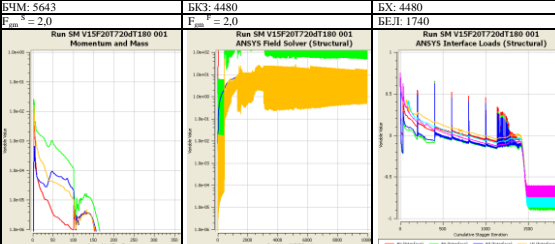
Табела П2 - наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 15\text{m/s}$



Табела П2 - наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 15\text{m/s}$

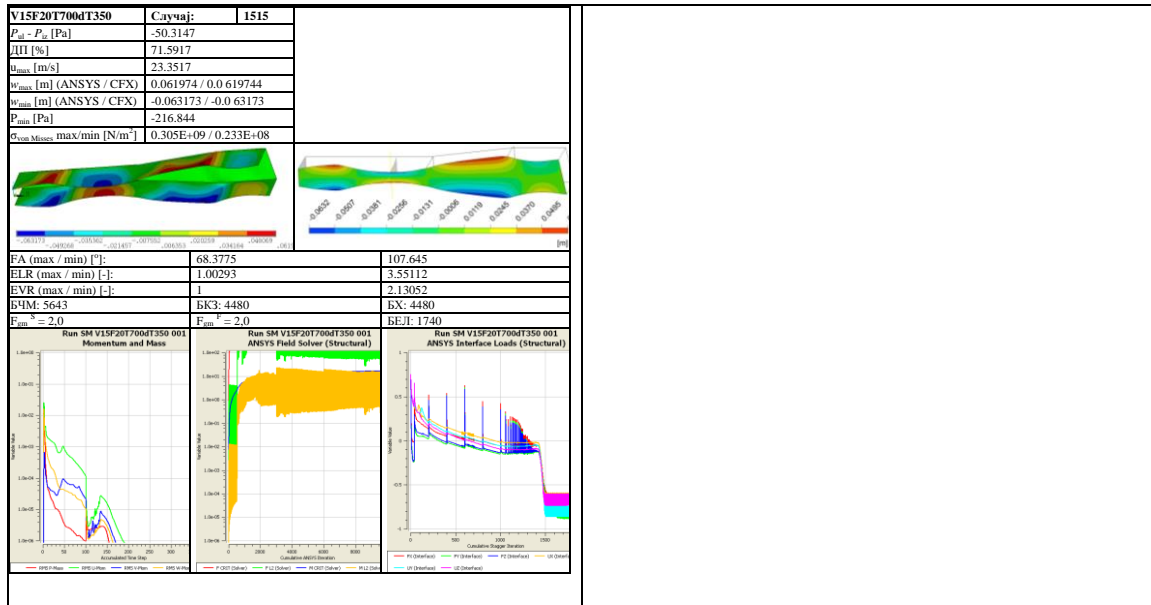


Табела П2 - наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 15\text{m/s}$

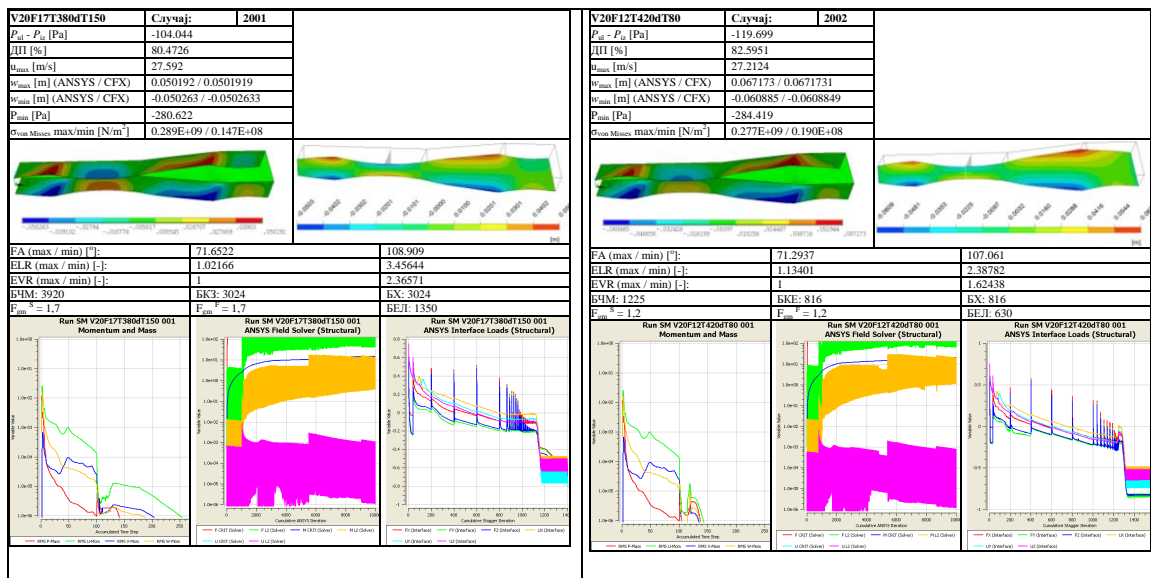
<table border="1"> <tr><td>V15F30T250dT200</td><td>Случај:</td><td>1511</td></tr> <tr><td><math>P_{ul} - P_{st}</math> [Pa]</td><td></td><td>-43.9911</td></tr> <tr><td>ДП [%]</td><td></td><td>82.2079</td></tr> <tr><td><math>U_{max}</math> [m/s]</td><td></td><td>20.5716</td></tr> <tr><td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>0.03334 / 0.0333403</td></tr> <tr><td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>-0.03341 / -0.0334103</td></tr> <tr><td><math>P_{min}</math> [Pa]</td><td></td><td>-130.518</td></tr> <tr><td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td><td></td><td>0.250E+09 / 0.144E+08</td></tr> </table>  <table border="1"> <tr><td>FA (max / min) [°]</td><td>77.2252</td><td>102.551</td></tr> <tr><td>ELR (max / min) [-]</td><td>1.00112</td><td>2.81207</td></tr> <tr><td>EVR (max / min) [-]</td><td>1</td><td>1.7758</td></tr> <tr><td>BHM: 17680</td><td>BK3: 15120</td><td>BX: 15120</td></tr> <tr><td><math>F_{in}^s = 3.0</math></td><td><math>F_{in}^f = 3.0</math></td><td>BEJ: 3915</td></tr> </table> 	V15F30T250dT200	Случај:	1511	$P_{ul} - P_{st}$ [Pa]		-43.9911	ДП [%]		82.2079	$U_{max}$ [m/s]		20.5716	$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.03334 / 0.0333403	$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.03341 / -0.0334103	$P_{min}$ [Pa]		-130.518	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.250E+09 / 0.144E+08	FA (max / min) [°]	77.2252	102.551	ELR (max / min) [-]	1.00112	2.81207	EVR (max / min) [-]	1	1.7758	BHM: 17680	BK3: 15120	BX: 15120	$F_{in}^s = 3.0$	$F_{in}^f = 3.0$	BEJ: 3915	<table border="1"> <tr><td>V15F10T200dT120</td><td>Случај:</td><td>1512</td></tr> <tr><td><math>P_{ul} - P_{st}</math> [Pa]</td><td></td><td>-67.4731</td></tr> <tr><td>ДП [%]</td><td></td><td>83.1173</td></tr> <tr><td><math>U_{max}</math> [m/s]</td><td></td><td>20.3574</td></tr> <tr><td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>0.032446 / 0.0324459</td></tr> <tr><td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>-0.032542 / -0.032542</td></tr> <tr><td><math>P_{min}</math> [Pa]</td><td></td><td>-153.388</td></tr> <tr><td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td><td></td><td>0.241E+09 / 0.381E+08</td></tr> </table>  <table border="1"> <tr><td>FA (max / min) [°]</td><td>77.9428</td><td>101.102</td></tr> <tr><td>ELR (max / min) [-]</td><td>1.00653</td><td>2.77038</td></tr> <tr><td>EVR (max / min) [-]</td><td>1</td><td>1.79615</td></tr> <tr><td>BHM: 870</td><td>BK3: 560</td><td>BX: 560</td></tr> <tr><td><math>F_{in}^s = 1.0</math></td><td><math>F_{in}^f = 1.0</math></td><td>BEJ: 435</td></tr> </table> 	V15F10T200dT120	Случај:	1512	$P_{ul} - P_{st}$ [Pa]		-67.4731	ДП [%]		83.1173	$U_{max}$ [m/s]		20.3574	$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.032446 / 0.0324459	$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.032542 / -0.032542	$P_{min}$ [Pa]		-153.388	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.241E+09 / 0.381E+08	FA (max / min) [°]	77.9428	101.102	ELR (max / min) [-]	1.00653	2.77038	EVR (max / min) [-]	1	1.79615	BHM: 870	BK3: 560	BX: 560	$F_{in}^s = 1.0$	$F_{in}^f = 1.0$	BEJ: 435
V15F30T250dT200	Случај:	1511																																																																													
$P_{ul} - P_{st}$ [Pa]		-43.9911																																																																													
ДП [%]		82.2079																																																																													
$U_{max}$ [m/s]		20.5716																																																																													
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.03334 / 0.0333403																																																																													
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.03341 / -0.0334103																																																																													
$P_{min}$ [Pa]		-130.518																																																																													
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.250E+09 / 0.144E+08																																																																													
FA (max / min) [°]	77.2252	102.551																																																																													
ELR (max / min) [-]	1.00112	2.81207																																																																													
EVR (max / min) [-]	1	1.7758																																																																													
BHM: 17680	BK3: 15120	BX: 15120																																																																													
$F_{in}^s = 3.0$	$F_{in}^f = 3.0$	BEJ: 3915																																																																													
V15F10T200dT120	Случај:	1512																																																																													
$P_{ul} - P_{st}$ [Pa]		-67.4731																																																																													
ДП [%]		83.1173																																																																													
$U_{max}$ [m/s]		20.3574																																																																													
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.032446 / 0.0324459																																																																													
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.032542 / -0.032542																																																																													
$P_{min}$ [Pa]		-153.388																																																																													
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.241E+09 / 0.381E+08																																																																													
FA (max / min) [°]	77.9428	101.102																																																																													
ELR (max / min) [-]	1.00653	2.77038																																																																													
EVR (max / min) [-]	1	1.79615																																																																													
BHM: 870	BK3: 560	BX: 560																																																																													
$F_{in}^s = 1.0$	$F_{in}^f = 1.0$	BEJ: 435																																																																													
<table border="1"> <tr><td>V15F20T200dT150</td><td>Случај:</td><td>1513</td></tr> <tr><td><math>P_{ul} - P_{st}</math> [Pa]</td><td></td><td>-59.853</td></tr> <tr><td>ДП [%]</td><td></td><td>85.885</td></tr> <tr><td><math>U_{max}</math> [m/s]</td><td></td><td>19.7653</td></tr> <tr><td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>0.038124 / 0.0381229</td></tr> <tr><td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>-0.038209 / -0.0382088</td></tr> <tr><td><math>P_{min}</math> [Pa]</td><td></td><td>-59.853</td></tr> <tr><td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td><td></td><td>0.272E+09 / 0.210E+08</td></tr> </table>  <table border="1"> <tr><td>FA (max / min) [°]</td><td>78.8851</td><td>101.115</td></tr> <tr><td>ELR (max / min) [-]</td><td>1.00471</td><td>2.67462</td></tr> <tr><td>EVR (max / min) [-]</td><td>1</td><td>1.89803</td></tr> <tr><td>BHM: 5643</td><td>BK3: 4480</td><td>BX: 4480</td></tr> <tr><td><math>F_{in}^s = 2.0</math></td><td><math>F_{in}^f = 2.0</math></td><td>BEJ: 1740</td></tr> </table> 	V15F20T200dT150	Случај:	1513	$P_{ul} - P_{st}$ [Pa]		-59.853	ДП [%]		85.885	$U_{max}$ [m/s]		19.7653	$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.038124 / 0.0381229	$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.038209 / -0.0382088	$P_{min}$ [Pa]		-59.853	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.272E+09 / 0.210E+08	FA (max / min) [°]	78.8851	101.115	ELR (max / min) [-]	1.00471	2.67462	EVR (max / min) [-]	1	1.89803	BHM: 5643	BK3: 4480	BX: 4480	$F_{in}^s = 2.0$	$F_{in}^f = 2.0$	BEJ: 1740	<table border="1"> <tr><td>V15F20T20dT180</td><td>Случај:</td><td>1514</td></tr> <tr><td><math>P_{ul} - P_{st}</math> [Pa]</td><td></td><td>-52.4799</td></tr> <tr><td>ДП [%]</td><td></td><td>76.9908</td></tr> <tr><td><math>U_{max}</math> [m/s]</td><td></td><td>21.862</td></tr> <tr><td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>0.073784 / 0.0737837</td></tr> <tr><td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>-0.074937 / -0.0749368</td></tr> <tr><td><math>P_{min}</math> [Pa]</td><td></td><td>-177.208</td></tr> <tr><td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td><td></td><td>0.297E+09 / 0.115E+08</td></tr> </table>  <table border="1"> <tr><td>FA (max / min) [°]</td><td>59.374</td><td>111.642</td></tr> <tr><td>ELR (max / min) [-]</td><td>1.00021</td><td>3.30645</td></tr> <tr><td>EVR (max / min) [-]</td><td>1</td><td>2.29584</td></tr> <tr><td>BHM: 5643</td><td>BK3: 4480</td><td>BX: 4480</td></tr> <tr><td><math>F_{in}^s = 2.0</math></td><td><math>F_{in}^f = 2.0</math></td><td>BEJ: 1740</td></tr> </table> 	V15F20T20dT180	Случај:	1514	$P_{ul} - P_{st}$ [Pa]		-52.4799	ДП [%]		76.9908	$U_{max}$ [m/s]		21.862	$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.073784 / 0.0737837	$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.074937 / -0.0749368	$P_{min}$ [Pa]		-177.208	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.297E+09 / 0.115E+08	FA (max / min) [°]	59.374	111.642	ELR (max / min) [-]	1.00021	3.30645	EVR (max / min) [-]	1	2.29584	BHM: 5643	BK3: 4480	BX: 4480	$F_{in}^s = 2.0$	$F_{in}^f = 2.0$	BEJ: 1740
V15F20T200dT150	Случај:	1513																																																																													
$P_{ul} - P_{st}$ [Pa]		-59.853																																																																													
ДП [%]		85.885																																																																													
$U_{max}$ [m/s]		19.7653																																																																													
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.038124 / 0.0381229																																																																													
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.038209 / -0.0382088																																																																													
$P_{min}$ [Pa]		-59.853																																																																													
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.272E+09 / 0.210E+08																																																																													
FA (max / min) [°]	78.8851	101.115																																																																													
ELR (max / min) [-]	1.00471	2.67462																																																																													
EVR (max / min) [-]	1	1.89803																																																																													
BHM: 5643	BK3: 4480	BX: 4480																																																																													
$F_{in}^s = 2.0$	$F_{in}^f = 2.0$	BEJ: 1740																																																																													
V15F20T20dT180	Случај:	1514																																																																													
$P_{ul} - P_{st}$ [Pa]		-52.4799																																																																													
ДП [%]		76.9908																																																																													
$U_{max}$ [m/s]		21.862																																																																													
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.073784 / 0.0737837																																																																													
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.074937 / -0.0749368																																																																													
$P_{min}$ [Pa]		-177.208																																																																													
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.297E+09 / 0.115E+08																																																																													
FA (max / min) [°]	59.374	111.642																																																																													
ELR (max / min) [-]	1.00021	3.30645																																																																													
EVR (max / min) [-]	1	2.29584																																																																													
BHM: 5643	BK3: 4480	BX: 4480																																																																													
$F_{in}^s = 2.0$	$F_{in}^f = 2.0$	BEJ: 1740																																																																													



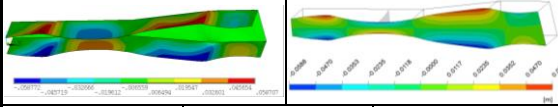
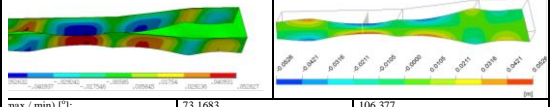
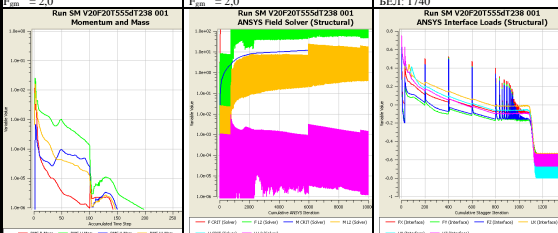
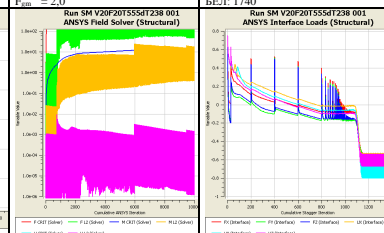
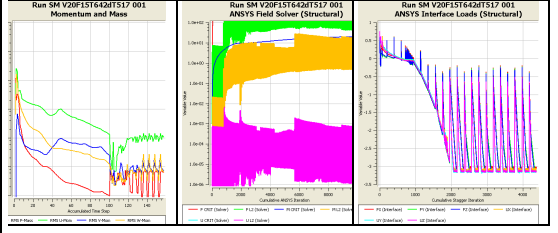
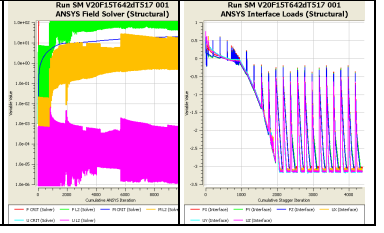
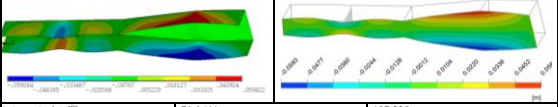
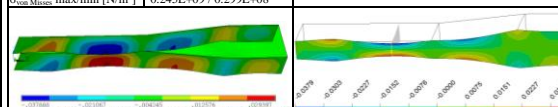
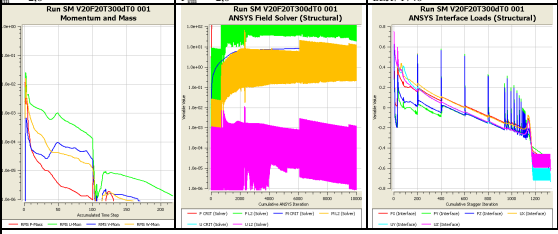
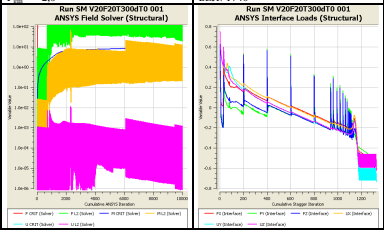
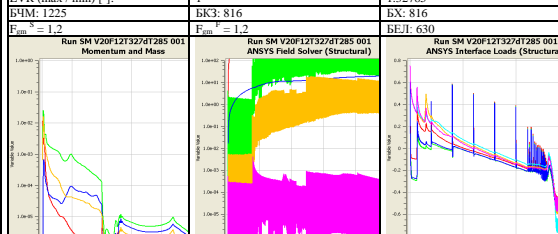
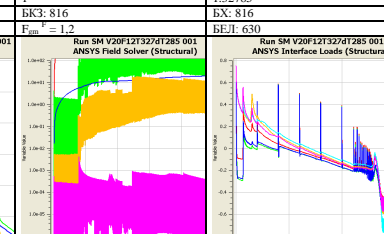
Табела П2 - наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 15\text{m/s}$



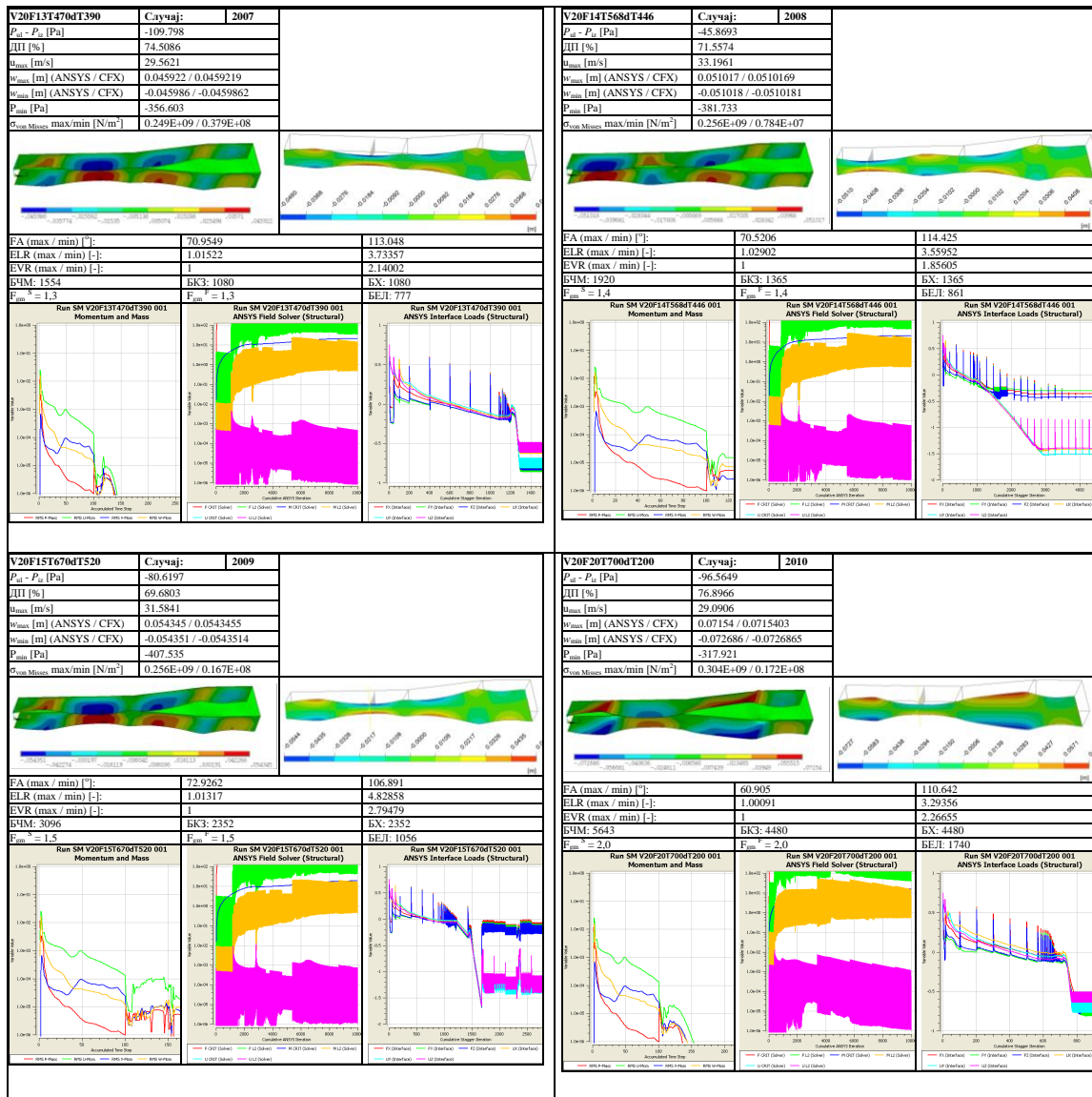
Табела П3: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 20\text{m/s}$



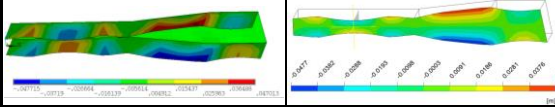
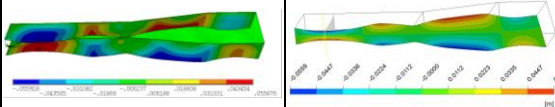
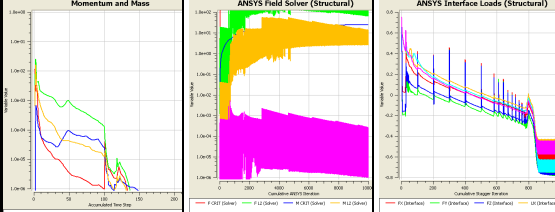
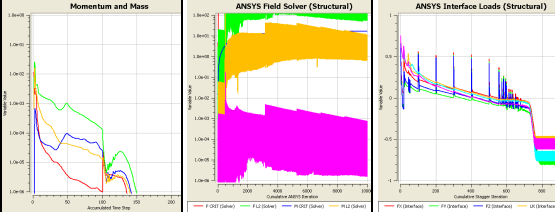
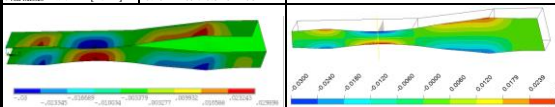
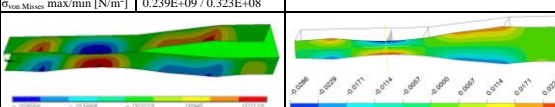
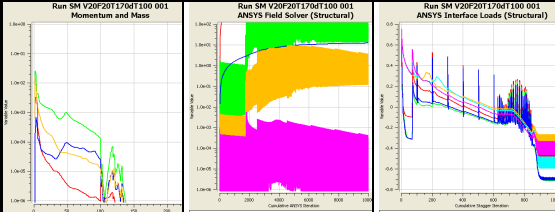
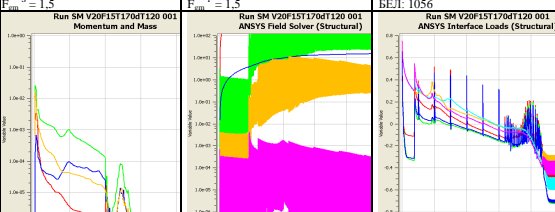
Табела ПЗ - наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 20\text{m/s}$

<b>V20F20T555dT238</b> $P_{st} - P_{st}$ [Pa] -99.7691 $\Pi$ [%] 76.4775 $u_{max}$ [m/s] 29.1639 $u_{max}$ [m] (ANSYS / CFX) 0.058707 / 0.0587071 $u_{min}$ [m] (ANSYS / CFX) -0.058772 / -0.058772 $P_{min}$ [Pa] -323.474 $\sigma_{von Mises, max/min}$ [N/m <sup>2</sup> ] 0.308E+09 / 0.165E+08	Случај: 2003		<b>15T642dT517</b> $P_{st} - P_{st}$ [Pa] -82.5995 $\Pi$ [%] 70.6447 $u_{max}$ [m/s] 31.1527 $u_{max}$ [m] (ANSYS / CFX) 0.052627 / 0.0526267 $u_{min}$ [m] (ANSYS / CFX) -0.052632 / -0.0526321 $P_{min}$ [Pa] -392.472 $\sigma_{von Mises, max/min}$ [N/m <sup>2</sup> ] 0.256E+09 / 0.357E+08	Случај: 2004	
<b>FA (max / min) [°]:</b> 69.6279 / 106.035 <b>ELR (max / min) [-]:</b> 1.00301 / 3.22156 <b>EVR (max / min) [-]:</b> 1 / 2.10949 <b>B4M:</b> 5643 / БК3: 4480 / БКХ: 4480 $F_{in} = 2.0$ / $F_{in} = 2.0$ / БЕЛ: 1740			<b>max / min [°]:</b> 73.1683 / 106.377 <b>(max / min) [-]:</b> 1.01299 / 4.71701 <b>(max / min) [-]:</b> 1 / 2.79498 <b>B4M:</b> 3096 / БК3: 2352 / БКХ: 2352 $F_{in} = 1.5$ / $F_{in} = 1.5$ / БЕЛ: 1056		
<b>20F20T300dT0</b> $P_{st} - P_{st}$ [Pa] -101.37 $\Pi$ [%] 76.0389 $u_{max}$ [m/s] 28.9918 $u_{max}$ [m] (ANSYS / CFX) 0.056822 / 0.0568222 $u_{min}$ [m] (ANSYS / CFX) -0.059264 / -0.0592635 $P_{min}$ [Pa] -359.595 $\sigma_{von Mises, max/min}$ [N/m <sup>2</sup> ] 0.299E+09 / 0.248E+08	Случај: 2005		<b>V20F12T327dT285</b> $P_{st} - P_{st}$ [Pa] -116.082 $\Pi$ [%] 79.4392 $u_{max}$ [m/s] 28.0871 $u_{max}$ [m] (ANSYS / CFX) 0.037808 / 0.0378079 $u_{min}$ [m] (ANSYS / CFX) -0.037888 / -0.037888 $P_{min}$ [Pa] -300.898 $\sigma_{von Mises, max/min}$ [N/m <sup>2</sup> ] 0.245E+09 / 0.299E+08	Случај: 2006	
<b>A (max / min) [°]:</b> 71.9644 / 107.325 <b>ELR (max / min) [-]:</b> 1.00476 / 3.22387 <b>ELR (max / min) [-]:</b> 1 / 2.06142 <b>B4M:</b> 5643 / БК3: 4480 / БКХ: 4480 $F_{in} = 2.0$ / $F_{in} = 2.0$ / БЕЛ: 1740			<b>FA (max / min) [°]:</b> 76.2213 / 102.64 <b>ELR (max / min) [-]:</b> 1.13664 / 2.41489 <b>EVR (max / min) [-]:</b> 1 / 1.32785 <b>B4M:</b> 1225 / БК3: 816 / БКХ: 816 $F_{in} = 1.2$ / $F_{in} = 1.2$ / БЕЛ: 630		

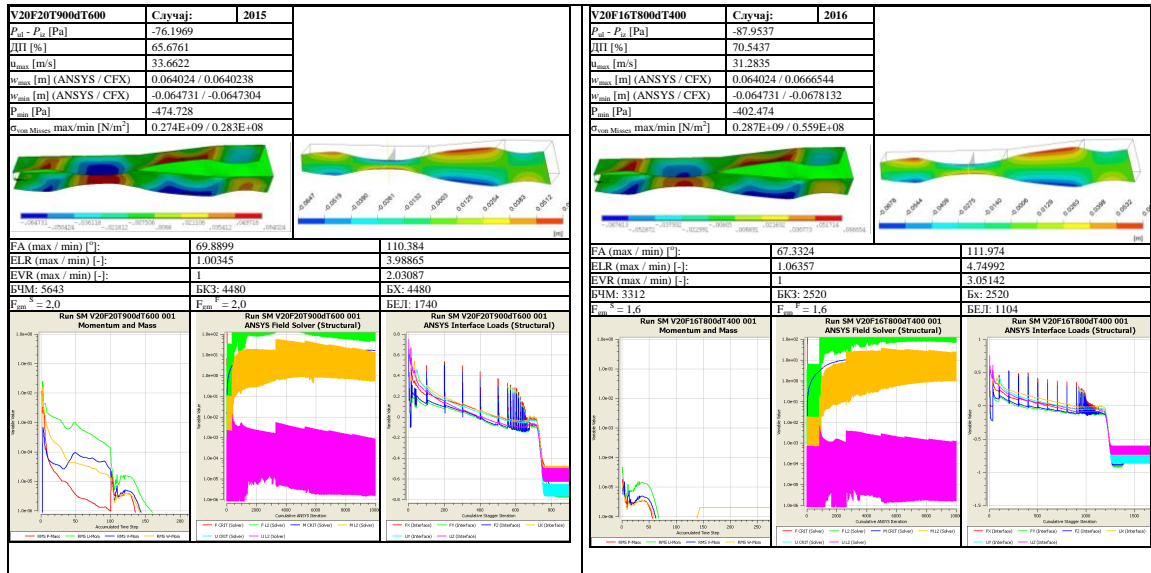
Табела ПЗ - наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 20\text{m/s}$



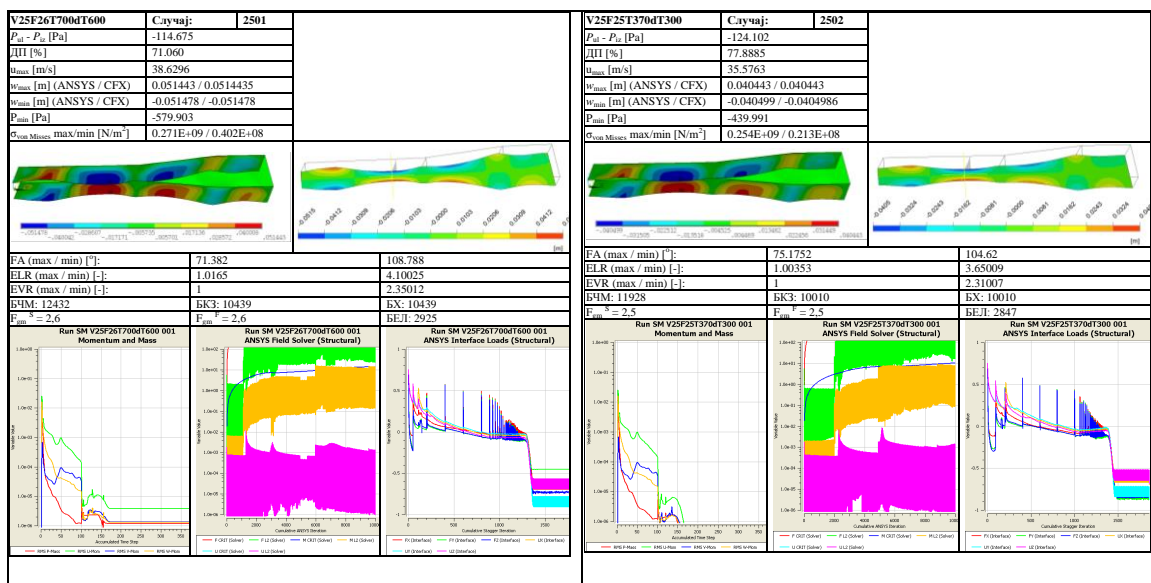
Табела ПЗ - наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 20\text{m/s}$

<b>V20F10T500d1T300</b> $P_{01} - P_{02}$ [Pa] -105.117 $\Delta H$ [%] 81.8442 $w_{max}$ [m/s] 27.467 $w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX) 0.047013 / 0.0470135 $w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX) -0.047715 / -0.047715 $P_{min}$ [Pa] -286.492 $\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ] 0.252E+09 / 0.605E+08	Случај: 2011		<b>V20F20T700d1T500</b> $P_{01} - P_{02}$ [Pa] -24.394 $\Delta H$ [%] 68.6954 $w_{max}$ [m/s] 34.9262 $w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX) 0.055876 / 0.0558765 $w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX) -0.055928 / -0.0559275 $P_{min}$ [Pa] -414.02 $\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ] 0.261E+09 / 0.344E+08	Случај: 2012	
FA (max / min) [°]: 74.1978 / 104.646 ELR (max / min) [-]: 1.00465 / 2.76738 EVR (max / min) [-]: 1 / 1.94274 $\delta^4M$ : 870 / БК3: 560 $F_{in}^s = 1,0$ / $F_{in}^l = 1,0$	BEJ: 435	FA (max / min) [°]: 71.5572 / 108.562 ELR (max / min) [-]: 1.00472 / 3.69587 EVR (max / min) [-]: 1 / 1.93868 $\delta^4M$ : 5643 / БК3: 4480 $F_{in}^s = 2,0$ / $F_{in}^l = 2,0$	BEJ: 1740		
					
<b>V20F20T170d1T100</b> $P_{01} - P_{02}$ [Pa] -102.938 $\Delta H$ [%] 84.4491 $w_{max}$ [m/s] 26.7305 $w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX) 0.029898 / 0.0298984 $w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX) -0.03 / -0.0300002 $P_{min}$ [Pa] -236.306 $\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ] 0.252E+09 / 0.328E+08	Случај: 2013		<b>V20F15T170d1T120</b> $P_{01} - P_{02}$ [Pa] -102.488 $\Delta H$ [%] 85.283 $w_{max}$ [m/s] 26.2641 $w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX) 0.028454 / 0.0284541 $w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX) -0.028558 / -0.0285579 $P_{min}$ [Pa] -228.948 $\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ] 0.239E+09 / 0.323E+08	Случај: 2014	
FA (max / min) [°]: 79.0614 / 100.857 ELR (max / min) [-]: 1.00533 / 2.70953 EVR (max / min) [-]: 1 / 1.80296 $\delta^4M$ : 5643 / БК3: 4480 $F_{in}^s = 2,0$ / $F_{in}^l = 2,0$	BEJ: 1740	FA (max / min) [°]: 76.6206 / 103.179 ELR (max / min) [-]: 1.01075 / 3.55947 EVR (max / min) [-]: 1 / 2.83237 $\delta^4M$ : 3096 / БК3: 2352 $F_{in}^s = 1,5$ / $F_{in}^l = 1,5$	BEJ: 1056		
					

Табела ПЗ - наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 20\text{m/s}$



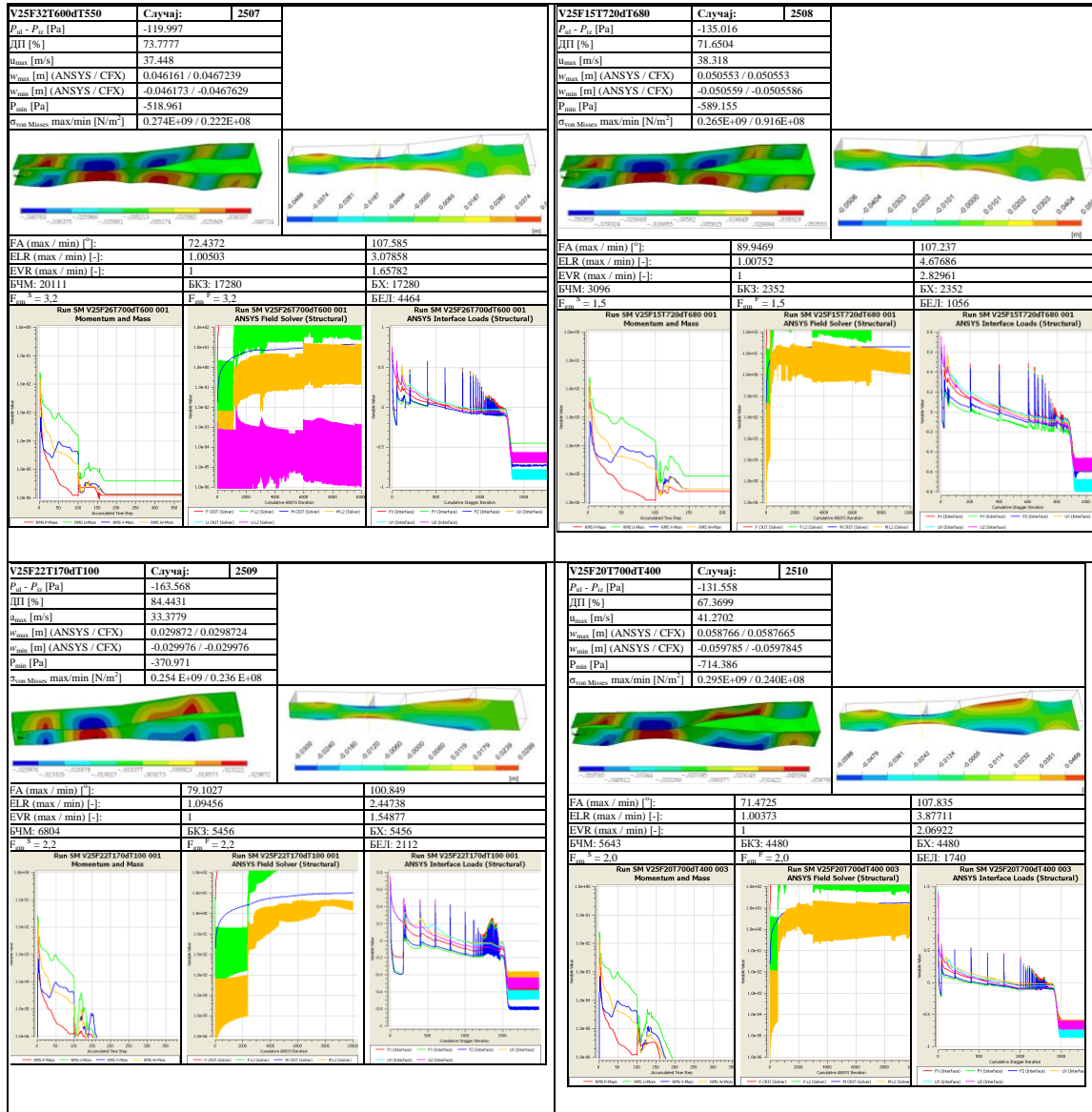
Табела П4: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 25\text{m/s}$



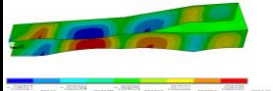
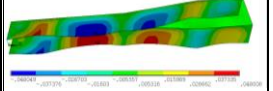
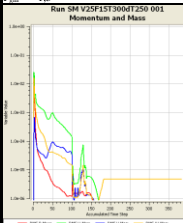
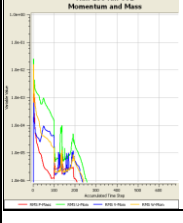
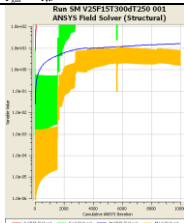
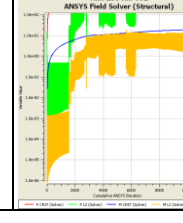
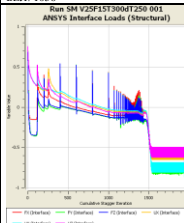
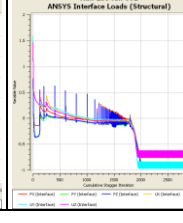
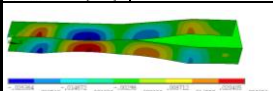
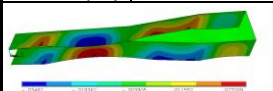

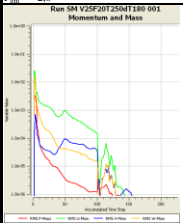
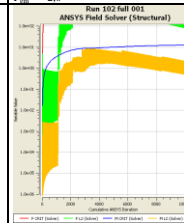
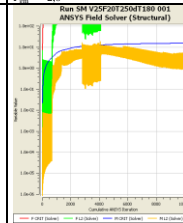
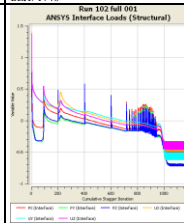
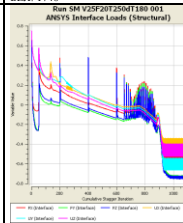
Табела П4 - наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 25\text{m/s}$

<b>V25F12T250dT200</b> Случај:    2503 $P_a - P_s$ [Pa]    -188.775 $\Pi$ [%]    81.9481 $W_{in}$ [m/s]    34.1119 $W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)    0.033972 / 0.0339721 $W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)    -0.034059 / -0.0340595 $P_{min}$ [Pa]    -434.704 $\sigma_{tot, \text{Mises}}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]    0.241E+09 / 0.308E+08				<b>V25F14T420dT370</b> Случај:    2504 $P_a - P_s$ [Pa]    -178.601 $\Pi$ [%]    76.8156 $W_{in}$ [m/s]    35.9727 $W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)    0.042244 / 0.0422441 $W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)    -0.042295 / -0.0422955 $P_{min}$ [Pa]    -518.274 $\sigma_{tot, \text{Mises}}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]    0.250E+09 / 0.576E+08			
$FA$ (max / min) [°]:    77.2719 $ELR$ (max / min) [-]:    1.133 $EVR$ (max / min) [-]:    1 $BIM$ : 1225 $F_{in}$ = 1.2	$FA$ (max / min) [°]:    101.665 $ELR$ (max / min) [-]:    2.31698 $EVR$ (max / min) [-]:    1.31212 $BIM$ : 816 $F_{in}$ = 1.2	$FA$ (max / min) [°]:    71.2018 $ELR$ (max / min) [-]:    1.00732 $EVR$ (max / min) [-]:    1 $BIM$ : 1920 $F_{in}$ = 1.4	$FA$ (max / min) [°]:    112.316 $ELR$ (max / min) [-]:    3.20245 $EVR$ (max / min) [-]:    1.89528 $BIM$ : 1365 $F_{in}$ = 1.4				
<b>V25F13T470dT440</b> Случај:    2505 $P_a - P_s$ [Pa]    -178.153 $\Pi$ [%]    75.9585 $W_{in}$ [m/s]    36.2199 $W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)    0.042244 / 0.0430859 $W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)    -0.042295 / -0.043153 $P_{min}$ [Pa]    -531.623 $\sigma_{tot, \text{Mises}}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]    0.252E+09 / 0.873E+08				<b>V25F18T550dT500</b> Случај:    2506 $P_a - P_s$ [Pa]    -142.587 $\Pi$ [%]    74.2886 $W_{in}$ [m/s]    37.1497 $W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)    0.046139 / 0.046139 $W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)    -0.046153 / 0.0461533 $P_{min}$ [Pa]    -533.08 $\sigma_{tot, \text{Mises}}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]    0.261E+09 / 0.561E+08			
$FA$ (max / min) [°]:    70.9516 $ELR$ (max / min) [-]:    1.0127 $EVR$ (max / min) [-]:    1 $BIM$ : 1554 $F_{in}$ = 1.3	$FA$ (max / min) [°]:    112.715 $ELR$ (max / min) [-]:    3.61108 $EVR$ (max / min) [-]:    2.12651 $BIM$ : 1080 $F_{in}$ = 1.3	$FA$ (max / min) [°]:    73.7931 $ELR$ (max / min) [-]:    1.06676 $EVR$ (max / min) [-]:    1 $BIM$ : 4590 $F_{in}$ = 1.8	$FA$ (max / min) [°]:    106.071 $ELR$ (max / min) [-]:    3.65701 $EVR$ (max / min) [-]:    2.2209 $BIM$ : 3600 $F_{in}$ = 1.8				

Табела П4 - наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 25\text{m/s}$

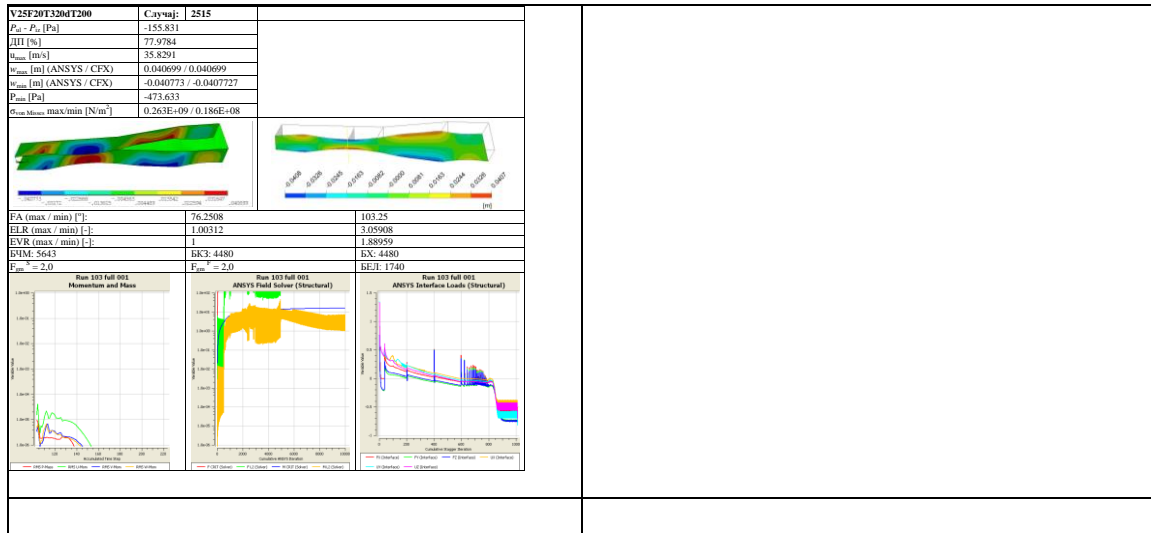


Табела П4 - наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 25\text{m/s}$

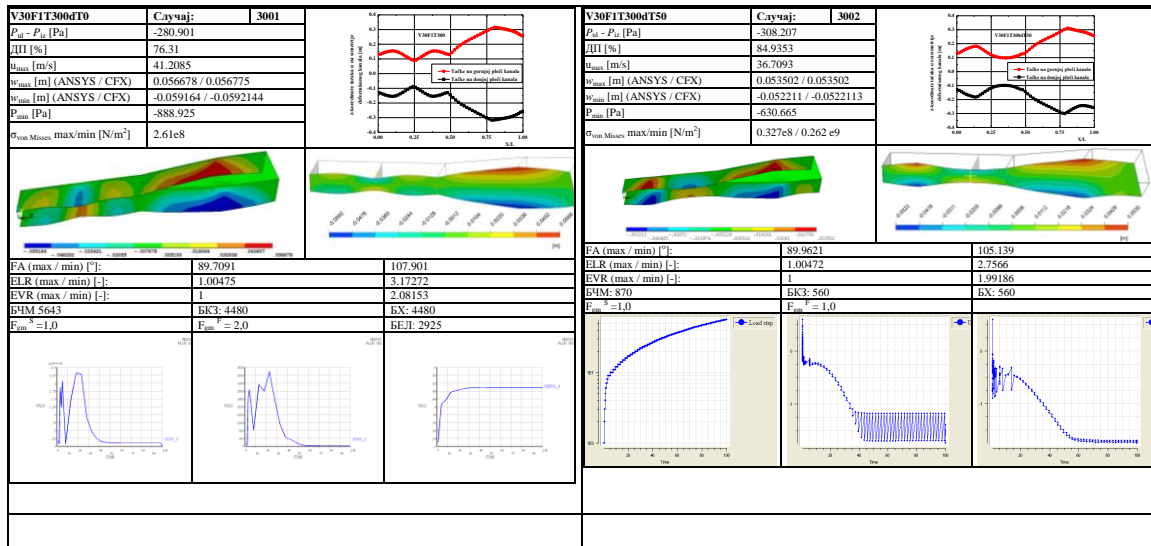
<b>V25F15T300dT250</b> Случај: 2511		<b>V25F15T600dT550</b> Случај: 2512	
$P_u - P_s$ [Pa]	-152.476	$P_u - P_s$ [Pa]	-138.751
$\Delta H$ [%]	80.2964	$\Delta H$ [%]	73.1906
$W_{max}$ [m/s]	34.5271	$W_{max}$ [m/s]	37.6147
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.036441 / 0.0364412	$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.045008 / 0.0480084
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.036517 / -0.0365165	$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.048049 / -0.0480489
$P_{min}$ [Pa]	-422.577	$P_{min}$ [Pa]	-557.491
$\sigma_{max/min}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	0.245E+09 / 0.847E+07	$\sigma_{max/min}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	0.260E+09 / 0.959E+08
			
FA (max / min) [-]	76.4943	102.645	73.7573
ELR (max / min) [-]	1.00961	3.86722	1.01124
EVR (max / min) [-]	1	2.81525	2.79953
BVM: 3096	БК3: 2352	БК3: 2352	БК3: 2352
$F_{in}^* = 1.5$	$F_{in}^* = 1.5$	BEJ: 1056	$F_{in}^* = 1.5$
			
			
			
<b>V25F20T170dT150</b> Случај: 2513		<b>V25F20T250dT180</b> Случај: 2514	
$P_u - P_s$ [Pa]	-159.935	$P_u - P_s$ [Pa]	-160.331
$\Delta H$ [%]	86.4299	$\Delta H$ [%]	81.4869
$W_{max}$ [m/s]	32.5411	$W_{max}$ [m/s]	34.3971
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.026251 / 0.0262512	$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.034737 / 0.0347373
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.026364 / -0.0263633	$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.03482 / -0.0348195
$P_{min}$ [Pa]	-334.055	$P_{min}$ [Pa]	-413.908
$\sigma_{max/min}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	0.241E+09 / 0.936E+07	$\sigma_{max/min}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	0.245E+09 / 0.978E+07
			
FA (max / min) [-]	79.3071	100.492	77.0601
ELR (max / min) [-]	1.00558	2.61289	1.00464
EVR (max / min) [-]	1	1.72333	1
BVM: 5643	БК3: 4480	БК3: 4480	БК3: 4480
$F_{in}^* = 2.0$	$F_{in}^* = 2.0$	BEJ: 1740	$F_{in}^* = 2.0$
			
			
			



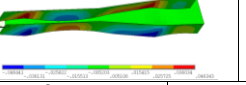
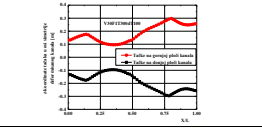
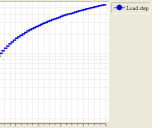
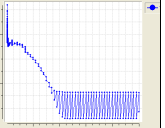
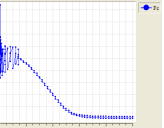
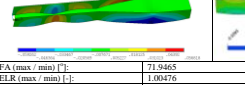
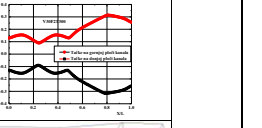
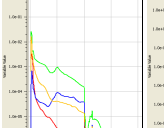
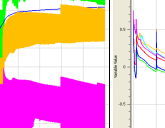
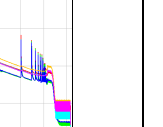
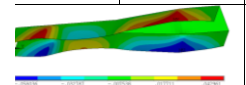
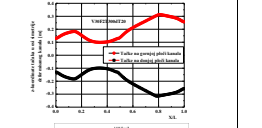
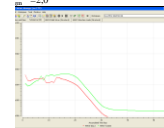
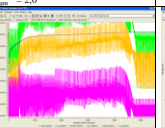
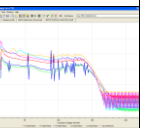
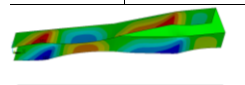
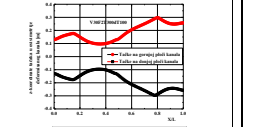
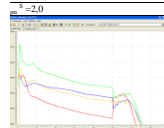
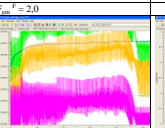
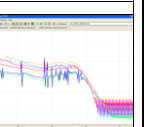
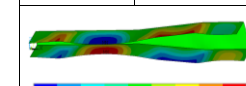
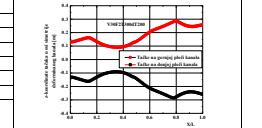
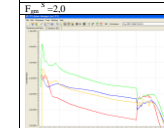
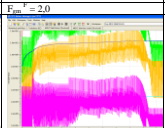
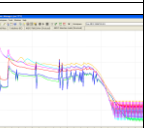
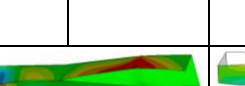
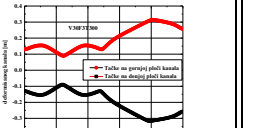
Табела П4 - наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 25\text{m/s}$



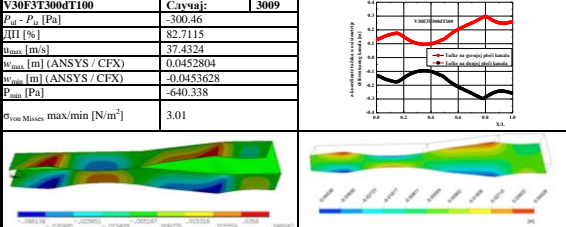
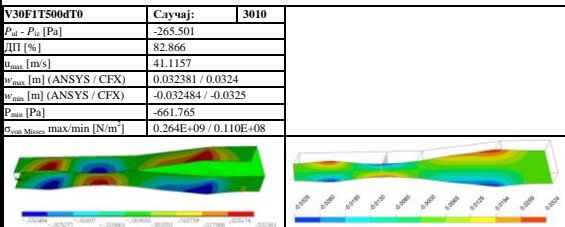
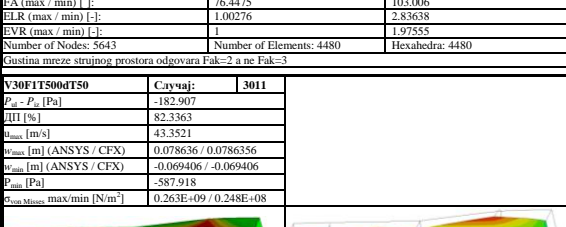
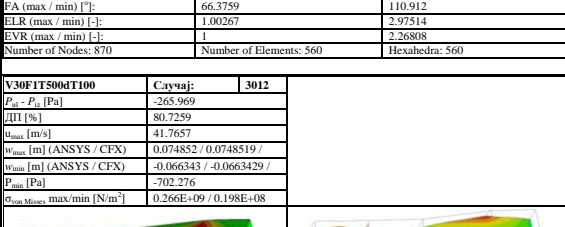
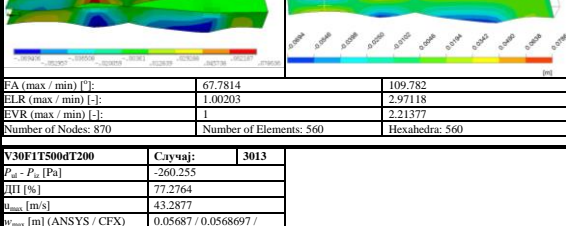
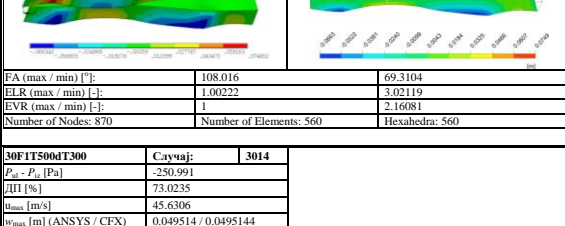
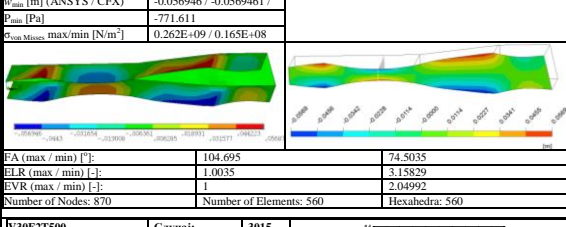
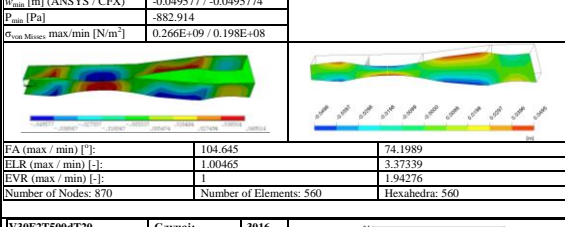
Табела П5: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 30\text{m/s}$



Табела П5 - наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 30\text{m/s}$

<p><b>V30F2T300dT100</b>    Случај:    <b>3003</b></p> <p><math>P_{in} - P_{out}</math> [Pa]    -301.264</p> <p><math>\Delta H</math> [%]    82.6058</p> <p><math>U_{max}</math> [m/s]    37.5748</p> <p><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)    0.046442 / 0.0463436</p> <p><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)    -0.046441 / -0.0464403</p> <p><math>P_{min}</math> [Pa]    -644.58</p> <p><math>\sigma_{max}</math> <math>\sigma_{min}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]    0.186 e8 / 0.257 e9</p>   <p>FA (max / min) [°]    76.7279    102.761</p> <p>ELR (max / min) [-]    1.00322    2.84401</p> <p>EVR (max / min) [-]    1    1.98447</p> <p>EM: 5643    BK3: 4480    BK: 4480</p> <p><math>F_{in} = 2.0</math>    <math>F_{out} = 2.0</math></p>   	<p><b>V30F2T300dT0</b>    Случај:    <b>3004</b></p> <p><math>P_{in} - P_{out}</math> [Pa]    -277.938</p> <p><math>\Delta H</math> [%]    76.0318</p> <p><math>U_{max}</math> [m/s]    41.0538</p> <p><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)    0.056818 / 0.0568183</p> <p><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)    -0.059262 / -0.059262</p> <p><math>P_{min}</math> [Pa]    -873.141</p> <p><math>\sigma_{max}</math> <math>\sigma_{min}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]    0.247 e8 / 0.299 e9</p>   <p>FA (max / min) [°]    71.8485    107.532</p> <p>ELR (max / min) [-]    1.00476    3.22604</p> <p>EVR (max / min) [-]    1    2.06145</p> <p>EM: 5643    BK3: 4480    BK: 4480</p> <p><math>F_{in} = 2.0</math>    <math>F_{out} = 2.0</math></p>   
<p><b>30F2T300dT20</b>    Случај:    <b>3005</b></p> <p><math>P_{in} - P_{out}</math> [Pa]    -298.055</p> <p><math>\Delta H</math> [%]    85.66</p> <p><math>U_{max}</math> [m/s]    36.1566</p> <p><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)    0.055885 / 0.055885</p> <p><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)    -0.058036 / -0.0580358</p> <p><math>P_{min}</math> [Pa]    -577.593</p> <p><math>\sigma_{max}</math> <math>\sigma_{min}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]    0.249 e08 / 0.299 e9</p>   <p>A (max / min) [°]    72.5239    106.892</p> <p>LR (max / min) [-]    1.00477    2.75246</p> <p>VR (max / min) [-]    1    2.04803</p> <p>EM: 5643    BK3: 4480    BK: 4480</p> <p><math>F_{in} = 2.0</math>    <math>F_{out} = 2.0</math></p>   	<p><b>30F2T300dT100</b>    Случај:    <b>3006</b></p> <p><math>P_{in} - P_{out}</math> [Pa]    -300.855</p> <p><math>\Delta H</math> [%]    83.029</p> <p><math>U_{max}</math> [m/s]    37.2776</p> <p><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)    0.045776 / 0.0457762</p> <p><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)    -0.045861 / -0.0458606</p> <p><math>P_{min}</math> [Pa]    -633.579</p> <p><math>\sigma_{max}</math> <math>\sigma_{min}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]    0.212 e8 / 0.286 e9</p>   <p>A (max / min) [°]    76.9259    102.748</p> <p>LR (max / min) [-]    1.00283    2.82254</p> <p>VR (max / min) [-]    1    1.97622</p> <p>EM: 5643    BK3: 4480    BK: 4480</p> <p><math>F_{in} = 2.0</math>    <math>F_{out} = 2.0</math></p>   
<p><b>V30F2T300dT200</b>    Случај:    <b>3007</b></p> <p><math>P_{in} - P_{out}</math> [Pa]    -294.997</p> <p><math>\Delta H</math> [%]    79.0137</p> <p><math>U_{max}</math> [m/s]    39.3617</p> <p><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)    0.03893 / 0.0389304</p> <p><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)    -0.039018 / -0.0390176</p> <p><math>P_{min}</math> [Pa]    -721.149</p> <p><math>\sigma_{max}</math> <math>\sigma_{min}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]    0.179 e8 / 0.256 e9</p>   <p>FA (max / min) [°]    76.3915    103.087</p> <p>ELR (max / min) [-]    1.00477    2.9841</p> <p>EVR (max / min) [-]    1    1.86108</p> <p>EM: 5643    BK3: 4480    BK: 4480</p> <p><math>F_{in} = 2.0</math>    <math>F_{out} = 2.0</math></p>   	<p><b>V30F2T300dT0</b>    Случај:    <b>3008</b></p> <p><math>P_{in} - P_{out}</math> [Pa]    -277.115</p> <p><math>\Delta H</math> [%]    76.0085</p> <p><math>U_{max}</math> [m/s]    41.0085</p> <p><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)    0.056946 / 0.0568118</p> <p><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)    -0.05942 / -0.059254</p> <p><math>P_{min}</math> [Pa]    -871.698</p> <p><math>\sigma_{max}</math> <math>\sigma_{min}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]    0.108 e8 / 0.318 e9</p>   <p>FA (max / min) [°]    71.2848    107.311</p> <p>ELR (max / min) [-]    1.00481    3.24228</p> <p>EVR (max / min) [-]    1    2.05838</p> <p>Number of Nodes: 5643    Number of Elements: 4480    Hexahedra: 4480</p> <p>Gustina mreže strujnog prostora odgovara Fak=2 a ne Fak=3</p>

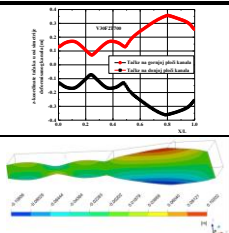
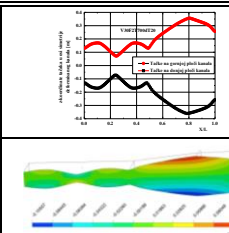
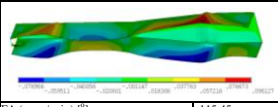
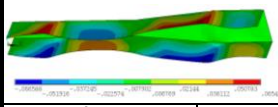
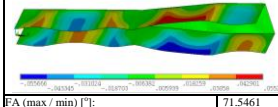
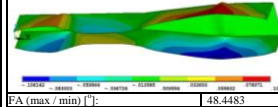
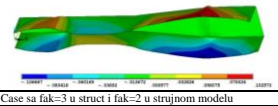
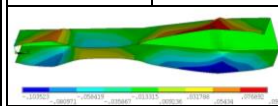
Табела П5 - наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 30\text{m/s}$

<table border="1"> <tr> <td><b>V30FIT300dT100</b></td> <td>Случај:</td> <td><b>3009</b></td> </tr> <tr> <td><math>P_a - P_e</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-300.46</td> </tr> <tr> <td>III [%]</td> <td></td> <td>82.7115</td> </tr> <tr> <td><math>u_{max}</math> [m/s]</td> <td></td> <td>37.4324</td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>0.0452804</td> </tr> <tr> <td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>-0.0453628</td> </tr> <tr> <td><math>P_{min}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-640.338</td> </tr> <tr> <td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td> <td></td> <td>3.01</td> </tr> </table>  <table border="1"> <tr> <td>FA (max / min) [°]:</td> <td>76.4475</td> <td>103.006</td> </tr> <tr> <td>ELR (max / min) [-]:</td> <td>1.00276</td> <td>2.83638</td> </tr> <tr> <td>EVR (max / min) [-]:</td> <td>1</td> <td>1.97555</td> </tr> <tr> <td>Number of Nodes: 5643</td> <td>Number of Elements: 4480</td> <td>Hexahedra: 4480</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Gustina mreze strujnog prostora odgovara Fak=2 a ne Fak=3</td> </tr> </table>	<b>V30FIT300dT100</b>	Случај:	<b>3009</b>	$P_a - P_e$ [Pa]		-300.46	III [%]		82.7115	$u_{max}$ [m/s]		37.4324	$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.0452804	$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.0453628	$P_{min}$ [Pa]		-640.338	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		3.01	FA (max / min) [°]:	76.4475	103.006	ELR (max / min) [-]:	1.00276	2.83638	EVR (max / min) [-]:	1	1.97555	Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480	Gustina mreze strujnog prostora odgovara Fak=2 a ne Fak=3			<table border="1"> <tr> <td><b>V30FIT500dT0</b></td> <td>Случај:</td> <td><b>3010</b></td> </tr> <tr> <td><math>P_a - P_e</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-265.501</td> </tr> <tr> <td>III [%]</td> <td></td> <td>82.866</td> </tr> <tr> <td><math>u_{max}</math> [m/s]</td> <td></td> <td>41.1157</td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>0.032381 / 0.0324</td> </tr> <tr> <td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>-0.032484 / -0.0325</td> </tr> <tr> <td><math>P_{min}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-661.765</td> </tr> <tr> <td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td> <td></td> <td>0.264E+09 / 0.110E+08</td> </tr> </table>  <table border="1"> <tr> <td>FA (max / min) [°]:</td> <td>66.3759</td> <td>110.912</td> </tr> <tr> <td>ELR (max / min) [-]:</td> <td>1.00267</td> <td>2.97514</td> </tr> <tr> <td>EVR (max / min) [-]:</td> <td>1</td> <td>2.26808</td> </tr> <tr> <td>Number of Nodes: 870</td> <td>Number of Elements: 560</td> <td>Hexahedra: 560</td> </tr> </table>	<b>V30FIT500dT0</b>	Случај:	<b>3010</b>	$P_a - P_e$ [Pa]		-265.501	III [%]		82.866	$u_{max}$ [m/s]		41.1157	$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.032381 / 0.0324	$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.032484 / -0.0325	$P_{min}$ [Pa]		-661.765	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.264E+09 / 0.110E+08	FA (max / min) [°]:	66.3759	110.912	ELR (max / min) [-]:	1.00267	2.97514	EVR (max / min) [-]:	1	2.26808	Number of Nodes: 870	Number of Elements: 560	Hexahedra: 560
<b>V30FIT300dT100</b>	Случај:	<b>3009</b>																																																																										
$P_a - P_e$ [Pa]		-300.46																																																																										
III [%]		82.7115																																																																										
$u_{max}$ [m/s]		37.4324																																																																										
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.0452804																																																																										
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.0453628																																																																										
$P_{min}$ [Pa]		-640.338																																																																										
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		3.01																																																																										
FA (max / min) [°]:	76.4475	103.006																																																																										
ELR (max / min) [-]:	1.00276	2.83638																																																																										
EVR (max / min) [-]:	1	1.97555																																																																										
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480																																																																										
Gustina mreze strujnog prostora odgovara Fak=2 a ne Fak=3																																																																												
<b>V30FIT500dT0</b>	Случај:	<b>3010</b>																																																																										
$P_a - P_e$ [Pa]		-265.501																																																																										
III [%]		82.866																																																																										
$u_{max}$ [m/s]		41.1157																																																																										
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.032381 / 0.0324																																																																										
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.032484 / -0.0325																																																																										
$P_{min}$ [Pa]		-661.765																																																																										
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.264E+09 / 0.110E+08																																																																										
FA (max / min) [°]:	66.3759	110.912																																																																										
ELR (max / min) [-]:	1.00267	2.97514																																																																										
EVR (max / min) [-]:	1	2.26808																																																																										
Number of Nodes: 870	Number of Elements: 560	Hexahedra: 560																																																																										
<table border="1"> <tr> <td><b>V30FIT500dT50</b></td> <td>Случај:</td> <td><b>3011</b></td> </tr> <tr> <td><math>P_a - P_e</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-182.907</td> </tr> <tr> <td>III [%]</td> <td></td> <td>82.3363</td> </tr> <tr> <td><math>u_{max}</math> [m/s]</td> <td></td> <td>43.3521</td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>0.078636 / 0.0786356</td> </tr> <tr> <td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>-0.069406 / -0.069406</td> </tr> <tr> <td><math>P_{min}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-587.918</td> </tr> <tr> <td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td> <td></td> <td>0.263E+09 / 0.248E+08</td> </tr> </table>  <table border="1"> <tr> <td>FA (max / min) [°]:</td> <td>67.7814</td> <td>109.782</td> </tr> <tr> <td>ELR (max / min) [-]:</td> <td>1.00203</td> <td>2.97118</td> </tr> <tr> <td>EVR (max / min) [-]:</td> <td>1</td> <td>2.21377</td> </tr> <tr> <td>Number of Nodes: 870</td> <td>Number of Elements: 560</td> <td>Hexahedra: 560</td> </tr> </table>	<b>V30FIT500dT50</b>	Случај:	<b>3011</b>	$P_a - P_e$ [Pa]		-182.907	III [%]		82.3363	$u_{max}$ [m/s]		43.3521	$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.078636 / 0.0786356	$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.069406 / -0.069406	$P_{min}$ [Pa]		-587.918	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.263E+09 / 0.248E+08	FA (max / min) [°]:	67.7814	109.782	ELR (max / min) [-]:	1.00203	2.97118	EVR (max / min) [-]:	1	2.21377	Number of Nodes: 870	Number of Elements: 560	Hexahedra: 560	<table border="1"> <tr> <td><b>V30FIT500dT100</b></td> <td>Случај:</td> <td><b>3012</b></td> </tr> <tr> <td><math>P_a - P_e</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-265.969</td> </tr> <tr> <td>III [%]</td> <td></td> <td>80.7259</td> </tr> <tr> <td><math>u_{max}</math> [m/s]</td> <td></td> <td>41.7657</td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>0.074852 / 0.0748519</td> </tr> <tr> <td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>-0.066343 / -0.0663429</td> </tr> <tr> <td><math>P_{min}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-702.276</td> </tr> <tr> <td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td> <td></td> <td>0.266E+09 / 0.198E+08</td> </tr> </table>  <table border="1"> <tr> <td>FA (max / min) [°]:</td> <td>108.016</td> <td>69.3104</td> </tr> <tr> <td>ELR (max / min) [-]:</td> <td>1.00222</td> <td>3.02119</td> </tr> <tr> <td>EVR (max / min) [-]:</td> <td>1</td> <td>2.16081</td> </tr> <tr> <td>Number of Nodes: 870</td> <td>Number of Elements: 560</td> <td>Hexahedra: 560</td> </tr> </table>	<b>V30FIT500dT100</b>	Случај:	<b>3012</b>	$P_a - P_e$ [Pa]		-265.969	III [%]		80.7259	$u_{max}$ [m/s]		41.7657	$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.074852 / 0.0748519	$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.066343 / -0.0663429	$P_{min}$ [Pa]		-702.276	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.266E+09 / 0.198E+08	FA (max / min) [°]:	108.016	69.3104	ELR (max / min) [-]:	1.00222	3.02119	EVR (max / min) [-]:	1	2.16081	Number of Nodes: 870	Number of Elements: 560	Hexahedra: 560			
<b>V30FIT500dT50</b>	Случај:	<b>3011</b>																																																																										
$P_a - P_e$ [Pa]		-182.907																																																																										
III [%]		82.3363																																																																										
$u_{max}$ [m/s]		43.3521																																																																										
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.078636 / 0.0786356																																																																										
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.069406 / -0.069406																																																																										
$P_{min}$ [Pa]		-587.918																																																																										
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.263E+09 / 0.248E+08																																																																										
FA (max / min) [°]:	67.7814	109.782																																																																										
ELR (max / min) [-]:	1.00203	2.97118																																																																										
EVR (max / min) [-]:	1	2.21377																																																																										
Number of Nodes: 870	Number of Elements: 560	Hexahedra: 560																																																																										
<b>V30FIT500dT100</b>	Случај:	<b>3012</b>																																																																										
$P_a - P_e$ [Pa]		-265.969																																																																										
III [%]		80.7259																																																																										
$u_{max}$ [m/s]		41.7657																																																																										
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.074852 / 0.0748519																																																																										
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.066343 / -0.0663429																																																																										
$P_{min}$ [Pa]		-702.276																																																																										
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.266E+09 / 0.198E+08																																																																										
FA (max / min) [°]:	108.016	69.3104																																																																										
ELR (max / min) [-]:	1.00222	3.02119																																																																										
EVR (max / min) [-]:	1	2.16081																																																																										
Number of Nodes: 870	Number of Elements: 560	Hexahedra: 560																																																																										
<table border="1"> <tr> <td><b>V30FIT500dT200</b></td> <td>Случај:</td> <td><b>3013</b></td> </tr> <tr> <td><math>P_a - P_e</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-260.255</td> </tr> <tr> <td>III [%]</td> <td></td> <td>77.2764</td> </tr> <tr> <td><math>u_{max}</math> [m/s]</td> <td></td> <td>43.2877</td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>0.05687 / 0.0568697</td> </tr> <tr> <td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>-0.056946 / -0.0569461</td> </tr> <tr> <td><math>P_{min}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-771.611</td> </tr> <tr> <td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td> <td></td> <td>0.262E+09 / 0.165E+08</td> </tr> </table>  <table border="1"> <tr> <td>FA (max / min) [°]:</td> <td>104.695</td> <td>74.5035</td> </tr> <tr> <td>ELR (max / min) [-]:</td> <td>1.0035</td> <td>3.15829</td> </tr> <tr> <td>EVR (max / min) [-]:</td> <td>1</td> <td>2.04992</td> </tr> <tr> <td>Number of Nodes: 870</td> <td>Number of Elements: 560</td> <td>Hexahedra: 560</td> </tr> </table>	<b>V30FIT500dT200</b>	Случај:	<b>3013</b>	$P_a - P_e$ [Pa]		-260.255	III [%]		77.2764	$u_{max}$ [m/s]		43.2877	$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.05687 / 0.0568697	$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.056946 / -0.0569461	$P_{min}$ [Pa]		-771.611	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.262E+09 / 0.165E+08	FA (max / min) [°]:	104.695	74.5035	ELR (max / min) [-]:	1.0035	3.15829	EVR (max / min) [-]:	1	2.04992	Number of Nodes: 870	Number of Elements: 560	Hexahedra: 560	<table border="1"> <tr> <td><b>V30FIT500dT300</b></td> <td>Случај:</td> <td><b>3014</b></td> </tr> <tr> <td><math>P_a - P_e</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-250.991</td> </tr> <tr> <td>III [%]</td> <td></td> <td>73.0235</td> </tr> <tr> <td><math>u_{max}</math> [m/s]</td> <td></td> <td>45.6306</td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>0.049514 / 0.0495144</td> </tr> <tr> <td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>-0.049577 / -0.0495774</td> </tr> <tr> <td><math>P_{min}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-882.914</td> </tr> <tr> <td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td> <td></td> <td>0.266E+09 / 0.198E+08</td> </tr> </table>  <table border="1"> <tr> <td>FA (max / min) [°]:</td> <td>104.645</td> <td>74.1989</td> </tr> <tr> <td>ELR (max / min) [-]:</td> <td>1.00465</td> <td>3.37339</td> </tr> <tr> <td>EVR (max / min) [-]:</td> <td>1</td> <td>1.94276</td> </tr> <tr> <td>Number of Nodes: 870</td> <td>Number of Elements: 560</td> <td>Hexahedra: 560</td> </tr> </table>	<b>V30FIT500dT300</b>	Случај:	<b>3014</b>	$P_a - P_e$ [Pa]		-250.991	III [%]		73.0235	$u_{max}$ [m/s]		45.6306	$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.049514 / 0.0495144	$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.049577 / -0.0495774	$P_{min}$ [Pa]		-882.914	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.266E+09 / 0.198E+08	FA (max / min) [°]:	104.645	74.1989	ELR (max / min) [-]:	1.00465	3.37339	EVR (max / min) [-]:	1	1.94276	Number of Nodes: 870	Number of Elements: 560	Hexahedra: 560			
<b>V30FIT500dT200</b>	Случај:	<b>3013</b>																																																																										
$P_a - P_e$ [Pa]		-260.255																																																																										
III [%]		77.2764																																																																										
$u_{max}$ [m/s]		43.2877																																																																										
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.05687 / 0.0568697																																																																										
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.056946 / -0.0569461																																																																										
$P_{min}$ [Pa]		-771.611																																																																										
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.262E+09 / 0.165E+08																																																																										
FA (max / min) [°]:	104.695	74.5035																																																																										
ELR (max / min) [-]:	1.0035	3.15829																																																																										
EVR (max / min) [-]:	1	2.04992																																																																										
Number of Nodes: 870	Number of Elements: 560	Hexahedra: 560																																																																										
<b>V30FIT500dT300</b>	Случај:	<b>3014</b>																																																																										
$P_a - P_e$ [Pa]		-250.991																																																																										
III [%]		73.0235																																																																										
$u_{max}$ [m/s]		45.6306																																																																										
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.049514 / 0.0495144																																																																										
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.049577 / -0.0495774																																																																										
$P_{min}$ [Pa]		-882.914																																																																										
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.266E+09 / 0.198E+08																																																																										
FA (max / min) [°]:	104.645	74.1989																																																																										
ELR (max / min) [-]:	1.00465	3.37339																																																																										
EVR (max / min) [-]:	1	1.94276																																																																										
Number of Nodes: 870	Number of Elements: 560	Hexahedra: 560																																																																										
<table border="1"> <tr> <td><b>V30FIT500</b></td> <td>Случај:</td> <td><b>3015</b></td> </tr> <tr> <td><math>P_a - P_e</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-234.827</td> </tr> <tr> <td>III [%]</td> <td></td> <td>82.34</td> </tr> <tr> <td><math>u_{max}</math> [m/s]</td> <td></td> <td>42.1471</td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>0.081538</td> </tr> <tr> <td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>-0.084976</td> </tr> <tr> <td><math>P_{min}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-643.178</td> </tr> <tr> <td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td> <td></td> <td>3.05 e8</td> </tr> </table>  <table border="1"> <tr> <td>FA (max / min) [°]:</td> <td>60.0923</td> <td>111.727</td> </tr> <tr> <td>ELR (max / min) [-]:</td> <td>1.00212</td> <td>3.12866</td> </tr> <tr> <td>EVR (max / min) [-]:</td> <td>1</td> <td>2.27118</td> </tr> <tr> <td>Number of Nodes: 5643</td> <td>Number of Elements: 4480</td> <td>Hexahedra: 4480</td> </tr> </table>	<b>V30FIT500</b>	Случај:	<b>3015</b>	$P_a - P_e$ [Pa]		-234.827	III [%]		82.34	$u_{max}$ [m/s]		42.1471	$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.081538	$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.084976	$P_{min}$ [Pa]		-643.178	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		3.05 e8	FA (max / min) [°]:	60.0923	111.727	ELR (max / min) [-]:	1.00212	3.12866	EVR (max / min) [-]:	1	2.27118	Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480	<table border="1"> <tr> <td><b>V30FIT500dT20</b></td> <td>Случај:</td> <td><b>3016</b></td> </tr> <tr> <td><math>P_a - P_e</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-267.89</td> </tr> <tr> <td>III [%]</td> <td></td> <td>82.40</td> </tr> <tr> <td><math>u_{max}</math> [m/s]</td> <td></td> <td>37.9161</td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>0.080435</td> </tr> <tr> <td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>-0.08388</td> </tr> <tr> <td><math>P_{min}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-635.543</td> </tr> <tr> <td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td> <td></td> <td>3.09 e8</td> </tr> </table>  <table border="1"> <tr> <td>FA (max / min) [°]:</td> <td>60.5965</td> <td>111.419</td> </tr> <tr> <td>ELR (max / min) [-]:</td> <td>1.00204</td> <td>3.0926</td> </tr> <tr> <td>EVR (max / min) [-]:</td> <td>1</td> <td>2.25814</td> </tr> <tr> <td>Number of Nodes: 5643</td> <td>Number of Elements: 4480</td> <td>Hexahedra: 4480</td> </tr> </table>	<b>V30FIT500dT20</b>	Случај:	<b>3016</b>	$P_a - P_e$ [Pa]		-267.89	III [%]		82.40	$u_{max}$ [m/s]		37.9161	$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.080435	$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.08388	$P_{min}$ [Pa]		-635.543	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		3.09 e8	FA (max / min) [°]:	60.5965	111.419	ELR (max / min) [-]:	1.00204	3.0926	EVR (max / min) [-]:	1	2.25814	Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480			
<b>V30FIT500</b>	Случај:	<b>3015</b>																																																																										
$P_a - P_e$ [Pa]		-234.827																																																																										
III [%]		82.34																																																																										
$u_{max}$ [m/s]		42.1471																																																																										
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.081538																																																																										
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.084976																																																																										
$P_{min}$ [Pa]		-643.178																																																																										
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		3.05 e8																																																																										
FA (max / min) [°]:	60.0923	111.727																																																																										
ELR (max / min) [-]:	1.00212	3.12866																																																																										
EVR (max / min) [-]:	1	2.27118																																																																										
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480																																																																										
<b>V30FIT500dT20</b>	Случај:	<b>3016</b>																																																																										
$P_a - P_e$ [Pa]		-267.89																																																																										
III [%]		82.40																																																																										
$u_{max}$ [m/s]		37.9161																																																																										
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.080435																																																																										
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.08388																																																																										
$P_{min}$ [Pa]		-635.543																																																																										
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		3.09 e8																																																																										
FA (max / min) [°]:	60.5965	111.419																																																																										
ELR (max / min) [-]:	1.00204	3.0926																																																																										
EVR (max / min) [-]:	1	2.25814																																																																										
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480																																																																										

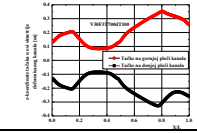
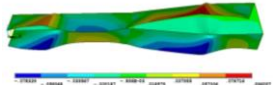
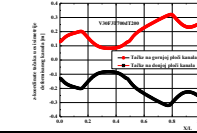
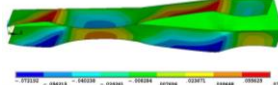
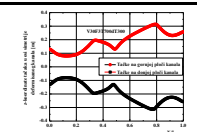
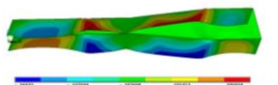

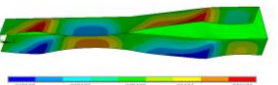
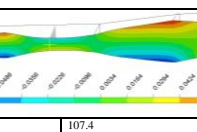
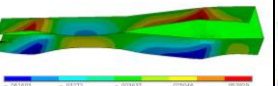
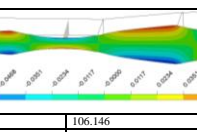
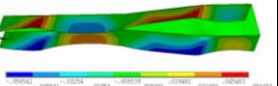
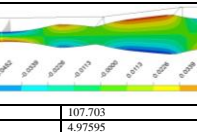
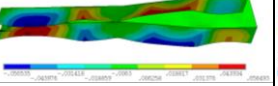
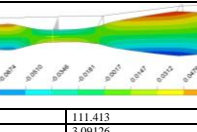
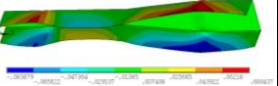
Табела П5 - наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 30\text{m/s}$

<b>V30F2T500dT50</b>	Случај:	<b>3017</b>	
$P_d - P_v$ [Pa]	-241.521		
$\beta$ [%]	82.31		
$W_{max}$ [m/s]	41.8467		
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.78838		
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.06699		
$P_{min}$ [Pa]	-632.493		
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	3.13 e8		
FA (max / min) [°]	61.9529	110.521	
ELR (max / min) [-]	1.00173	2.99202	
EVR (max / min) [-]	1	2.23339	
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480	
<b>V30F2T500dT100</b>	Случај:	<b>3018</b>	
$P_d - P_v$ [Pa]	-239.441		
$\beta$ [%]	81.1952		
$W_{max}$ [m/s]	42.2428		
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.0752105		
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.064402		
$P_{min}$ [Pa]	-648.427		
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	3.18 e8		
FA (max / min) [°]	89.8465	108.856	
ELR (max / min) [-]	1.00207	3.01579	
EVR (max / min) [-]	1	2.19941	
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480	
<b>V30F2T500dT200</b>	Случај:	<b>3019</b>	
$\Delta P_{stat}$ [Pa]	-235.754		
FA [%]	78.2384		
$W_{max}$ [m/s]	43.8291		
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.0569696		
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.0570455		
pressure <sub>stat</sub> [Pa]	-722.029		
von Mises <sub>stat</sub> [N/m <sup>2</sup> ]	3.06e8		
FA (max / min) [°]	70.5629	105.547	
ELR (max / min) [-]	1.00329	3.12158	
EVR (max / min) [-]	1	2.09287	
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480	
<b>V30F2T500dT300</b>	Случај:	<b>3020</b>	
$P_d - P_v$ [Pa]	-263.581		
$\beta$ [%]	72.0409		
$W_{max}$ [m/s]	43.5317		
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.050611		
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.0506873		
$P_{min}$ [Pa]	-907.302		
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	2.81 e8		
FA (max / min) [°]	74.0951	105.606	
ELR (max / min) [-]	1.00447	3.43915	
EVR (max / min) [-]	1	1.97967	
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480	
<b>V30F30T500dT300</b>	Случај:	<b>3021</b>	
$P_d - P_v$ [Pa]	-176.779		
$\beta$ [%]	72.3245		
$W_{max}$ [m/s]	46.2151		
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.050239 / 0.050239		
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.05029 / -0.0502905		
$P_{min}$ [Pa]	-813.955		
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	0.291 E+09 / 0.227 E+08		
FA (max / min) [°]	73.7742	106.127	
ELR (max / min) [-]	1.00265	3.42923	
EVR (max / min) [-]	1	1.94517	
Number of Nodes: 17680	Number of Elements: 15120	Hexahedra: 15120	
<b>V30F1T700</b>	Случај:	<b>3022</b>	
$P_d - P_v$ [Pa]	-133.6		
$\beta$ [%]	64.88		
$W_{max}$ [m/s]	49.0765		
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.102108		
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.105982		
$P_{min}$ [Pa]	-1301.18		
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	2.04 e8		
FA (max / min) [°]	60.356	116.7	
ELR (max / min) [-]	1.00045	4.29407	
EVR (max / min) [-]	1	2.54121	
Number of Nodes: 1189 / 5643	Number of Elements: 560 / 4480	Hexahedra: 560 / 4480	
Gornje vrednosti su potrebne ali imaš mrežu sa fak=2 u fluidu umesto sa fak=1			
<b>V30F1T700dT300</b>	Случај:	<b>3023</b>	
$P_d - P_v$ [Pa]	-255.442		
$\beta$ [%]	86.0967		
$W_{max}$ [m/s]	43.4741		
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.0647636		
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.0655786		
$P_{min}$ [Pa]	-924.002		
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	0.376e8 / 0.258e9		
FA (max / min) [°]	71.8815	107.304	
ELR (max / min) [-]	1.00256	3.48112	
EVR (max / min) [-]	1	2.12167	
Number of Nodes: 870	Number of Elements: 560	Hexahedra: 560	
<b>V30F1T700dT500</b>	Случај:	<b>3024</b>	
$P_d - P_v$ [Pa]	-229.449		
$\beta$ [%]	79.4498		
$W_{max}$ [m/s]	39.557		
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)	0.0552815 / 0.05531		
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)	-0.0558873 / -0.05559		
$P_{min}$ [Pa]	-723.139		
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]	0.597e8 / 0.246e9		
FA (max / min) [°]	72.3986	106.711	
ELR (max / min) [-]	1.00454	2.88926	
EVR (max / min) [-]	1	1.92855	
Number of Nodes: 870	Number of Elements: 560	Hexahedra: 560	

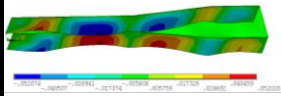
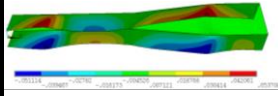
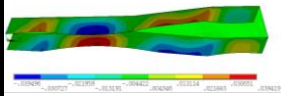
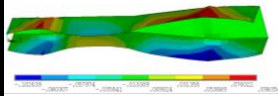
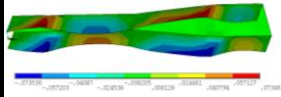
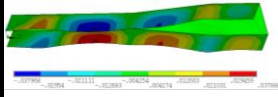
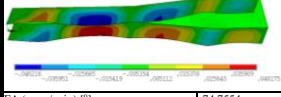
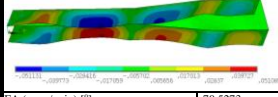
Табела П5 - наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 30\text{m/s}$

<table border="1"> <tr> <td><b>V30F21700</b></td> <td>Случај:</td> <td><b>3025</b></td> </tr> <tr> <td><math>P_a - P_e</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-113.105</td> </tr> <tr> <td>III [%]</td> <td></td> <td>64.288</td> </tr> <tr> <td><math>U_{max}</math> [m/s]</td> <td></td> <td>48.762</td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>0.102017</td> </tr> <tr> <td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>-0.106059</td> </tr> <tr> <td><math>P_{min}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-1234.37</td> </tr> <tr> <td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td> <td></td> <td>2.60 e8</td> </tr> </table>  <table border="1"> <tr> <td>FA (max / min) [°]</td> <td>50.0822</td> <td>119.222</td> </tr> <tr> <td>ELR (max / min) [-]</td> <td>1.00059</td> <td>4.33852</td> </tr> <tr> <td>EVR (max / min) [-]</td> <td>1</td> <td>2.45841</td> </tr> <tr> <td>Number of Nodes: 5643</td> <td>Number of Elements: 4480</td> <td>Hexahedra: 4480</td> </tr> </table>	<b>V30F21700</b>	Случај:	<b>3025</b>	$P_a - P_e$ [Pa]		-113.105	III [%]		64.288	$U_{max}$ [m/s]		48.762	$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.102017	$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.106059	$P_{min}$ [Pa]		-1234.37	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		2.60 e8	FA (max / min) [°]	50.0822	119.222	ELR (max / min) [-]	1.00059	4.33852	EVR (max / min) [-]	1	2.45841	Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480	<table border="1"> <tr> <td><b>V30F21700dT20</b></td> <td>Случај:</td> <td><b>3026</b></td> </tr> <tr> <td><math>P_a - P_e</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-126.55</td> </tr> <tr> <td>III [%]</td> <td></td> <td>64.3475</td> </tr> <tr> <td><math>U_{max}</math> [m/s]</td> <td></td> <td>48.8017</td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>0.101099</td> </tr> <tr> <td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>-0.105071</td> </tr> <tr> <td><math>P_{min}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-1236.9</td> </tr> <tr> <td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td> <td></td> <td>2.68 e8</td> </tr> </table>  <table border="1"> <tr> <td>FA (max / min) [°]</td> <td>50.529</td> <td>118.663</td> </tr> <tr> <td>ELR (max / min) [-]</td> <td>1.00043</td> <td>4.30904</td> </tr> <tr> <td>EVR (max / min) [-]</td> <td>1</td> <td>2.44581</td> </tr> <tr> <td>Number of Nodes: 5643</td> <td>Number of Elements: 4480</td> <td>Hexahedra: 4480</td> </tr> </table>	<b>V30F21700dT20</b>	Случај:	<b>3026</b>	$P_a - P_e$ [Pa]		-126.55	III [%]		64.3475	$U_{max}$ [m/s]		48.8017	$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.101099	$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.105071	$P_{min}$ [Pa]		-1236.9	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		2.68 e8	FA (max / min) [°]	50.529	118.663	ELR (max / min) [-]	1.00043	4.30904	EVR (max / min) [-]	1	2.44581	Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480
<b>V30F21700</b>	Случај:	<b>3025</b>																																																																							
$P_a - P_e$ [Pa]		-113.105																																																																							
III [%]		64.288																																																																							
$U_{max}$ [m/s]		48.762																																																																							
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.102017																																																																							
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.106059																																																																							
$P_{min}$ [Pa]		-1234.37																																																																							
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		2.60 e8																																																																							
FA (max / min) [°]	50.0822	119.222																																																																							
ELR (max / min) [-]	1.00059	4.33852																																																																							
EVR (max / min) [-]	1	2.45841																																																																							
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480																																																																							
<b>V30F21700dT20</b>	Случај:	<b>3026</b>																																																																							
$P_a - P_e$ [Pa]		-126.55																																																																							
III [%]		64.3475																																																																							
$U_{max}$ [m/s]		48.8017																																																																							
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.101099																																																																							
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.105071																																																																							
$P_{min}$ [Pa]		-1236.9																																																																							
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		2.68 e8																																																																							
FA (max / min) [°]	50.529	118.663																																																																							
ELR (max / min) [-]	1.00043	4.30904																																																																							
EVR (max / min) [-]	1	2.44581																																																																							
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480																																																																							
<table border="1"> <tr> <td><b>V30F21700dT100</b></td> <td>Случај:</td> <td><b>3027</b></td> </tr> <tr> <td><math>P_a - P_e</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-222.177</td> </tr> <tr> <td>III [%]</td> <td></td> <td>78.7259</td> </tr> <tr> <td><math>U_{max}</math> [m/s]</td> <td></td> <td>42.6723</td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>0.096127 / 0.0961275</td> </tr> <tr> <td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>-0.078966 / -0.0789656</td> </tr> <tr> <td><math>P_{min}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-678.81</td> </tr> <tr> <td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td> <td></td> <td>0.295 E+09 / 0.112E+08</td> </tr> </table>  <table border="1"> <tr> <td>FA (max / min) [°]</td> <td>115.45</td> <td>53.0022</td> </tr> <tr> <td>ELR (max / min) [-]</td> <td>1.00032</td> <td>3.5034</td> </tr> <tr> <td>EVR (max / min) [-]</td> <td>1</td> <td>2.38586</td> </tr> <tr> <td>Number of Nodes: 5643</td> <td>Number of Elements: 4480</td> <td>Hexahedra: 4480</td> </tr> </table>	<b>V30F21700dT100</b>	Случај:	<b>3027</b>	$P_a - P_e$ [Pa]		-222.177	III [%]		78.7259	$U_{max}$ [m/s]		42.6723	$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.096127 / 0.0961275	$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.078966 / -0.0789656	$P_{min}$ [Pa]		-678.81	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.295 E+09 / 0.112E+08	FA (max / min) [°]	115.45	53.0022	ELR (max / min) [-]	1.00032	3.5034	EVR (max / min) [-]	1	2.38586	Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480	<table border="1"> <tr> <td><b>V30F21700dT300</b></td> <td>Случај:</td> <td><b>3028</b></td> </tr> <tr> <td><math>P_a - P_e</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-221.928</td> </tr> <tr> <td>III [%]</td> <td></td> <td>73.9713</td> </tr> <tr> <td><math>U_{max}</math> [m/s]</td> <td></td> <td>44.9892</td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>0.065454 / 0.0654542</td> </tr> <tr> <td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>-0.066588 / -0.0665876</td> </tr> <tr> <td><math>P_{min}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-801.236</td> </tr> <tr> <td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td> <td></td> <td>0.310E+09 / 0.417E+08</td> </tr> </table>  <table border="1"> <tr> <td>FA (max / min) [°]</td> <td>108.919</td> <td>65.5423</td> </tr> <tr> <td>ELR (max / min) [-]</td> <td>1.00197</td> <td>3.41988</td> </tr> <tr> <td>EVR (max / min) [-]</td> <td>1</td> <td>2.18138</td> </tr> <tr> <td>Number of Nodes: 5643</td> <td>Number of Elements: 4480</td> <td>Hexahedra: 4480</td> </tr> </table>	<b>V30F21700dT300</b>	Случај:	<b>3028</b>	$P_a - P_e$ [Pa]		-221.928	III [%]		73.9713	$U_{max}$ [m/s]		44.9892	$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.065454 / 0.0654542	$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.066588 / -0.0665876	$P_{min}$ [Pa]		-801.236	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.310E+09 / 0.417E+08	FA (max / min) [°]	108.919	65.5423	ELR (max / min) [-]	1.00197	3.41988	EVR (max / min) [-]	1	2.18138	Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480
<b>V30F21700dT100</b>	Случај:	<b>3027</b>																																																																							
$P_a - P_e$ [Pa]		-222.177																																																																							
III [%]		78.7259																																																																							
$U_{max}$ [m/s]		42.6723																																																																							
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.096127 / 0.0961275																																																																							
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.078966 / -0.0789656																																																																							
$P_{min}$ [Pa]		-678.81																																																																							
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.295 E+09 / 0.112E+08																																																																							
FA (max / min) [°]	115.45	53.0022																																																																							
ELR (max / min) [-]	1.00032	3.5034																																																																							
EVR (max / min) [-]	1	2.38586																																																																							
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480																																																																							
<b>V30F21700dT300</b>	Случај:	<b>3028</b>																																																																							
$P_a - P_e$ [Pa]		-221.928																																																																							
III [%]		73.9713																																																																							
$U_{max}$ [m/s]		44.9892																																																																							
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.065454 / 0.0654542																																																																							
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.066588 / -0.0665876																																																																							
$P_{min}$ [Pa]		-801.236																																																																							
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.310E+09 / 0.417E+08																																																																							
FA (max / min) [°]	108.919	65.5423																																																																							
ELR (max / min) [-]	1.00197	3.41988																																																																							
EVR (max / min) [-]	1	2.18138																																																																							
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480																																																																							
<table border="1"> <tr> <td><b>V30F21700dT500</b></td> <td>Случај:</td> <td><b>3029</b></td> </tr> <tr> <td><math>P_a - P_e</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-276.939</td> </tr> <tr> <td>III [%]</td> <td></td> <td>79.946</td> </tr> <tr> <td><math>U_{max}</math> [m/s]</td> <td></td> <td>38.9733</td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>0.0552229 / 0.05531</td> </tr> <tr> <td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>-0.055666 / -0.05567</td> </tr> <tr> <td><math>P_{min}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-719.616</td> </tr> <tr> <td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td> <td></td> <td>0.362e8 / 0.258e9</td> </tr> </table>  <table border="1"> <tr> <td>FA (max / min) [°]</td> <td>71.5461</td> <td>108.544</td> </tr> <tr> <td>ELR (max / min) [-]</td> <td>1.00442</td> <td>2.87528</td> </tr> <tr> <td>EVR (max / min) [-]</td> <td>1</td> <td>1.93854</td> </tr> <tr> <td>Number of Nodes: 5643</td> <td>Number of Elements: 4480</td> <td>Hexahedra: 4480</td> </tr> </table>	<b>V30F21700dT500</b>	Случај:	<b>3029</b>	$P_a - P_e$ [Pa]		-276.939	III [%]		79.946	$U_{max}$ [m/s]		38.9733	$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.0552229 / 0.05531	$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.055666 / -0.05567	$P_{min}$ [Pa]		-719.616	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.362e8 / 0.258e9	FA (max / min) [°]	71.5461	108.544	ELR (max / min) [-]	1.00442	2.87528	EVR (max / min) [-]	1	1.93854	Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480	<table border="1"> <tr> <td><b>V30F31700</b></td> <td>Случај:</td> <td><b>3030</b></td> </tr> <tr> <td><math>P_a - P_e</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-225.6</td> </tr> <tr> <td>III [%]</td> <td></td> <td>85.4927</td> </tr> <tr> <td><math>U_{max}</math> [m/s]</td> <td></td> <td>40.7761</td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>0.101945 / 0.10194</td> </tr> <tr> <td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>-0.106024 / -0.010602</td> </tr> <tr> <td><math>P_{min}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-762.298</td> </tr> <tr> <td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td> <td></td> <td>3.01</td> </tr> </table>  <table border="1"> <tr> <td>FA (max / min) [°]</td> <td>48.4483</td> <td>119.938</td> </tr> <tr> <td>ELR (max / min) [-]</td> <td>1.00052</td> <td>3.86459</td> </tr> <tr> <td>EVR (max / min) [-]</td> <td>1</td> <td>2.43383</td> </tr> <tr> <td>Number of Nodes: 5643</td> <td>Number of Elements: 4480</td> <td>Hexahedra: 4480</td> </tr> </table> <p>Gustina mreže strujnog prostora odgovara Fak=2 a ne Fak=3</p>	<b>V30F31700</b>	Случај:	<b>3030</b>	$P_a - P_e$ [Pa]		-225.6	III [%]		85.4927	$U_{max}$ [m/s]		40.7761	$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.101945 / 0.10194	$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.106024 / -0.010602	$P_{min}$ [Pa]		-762.298	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		3.01	FA (max / min) [°]	48.4483	119.938	ELR (max / min) [-]	1.00052	3.86459	EVR (max / min) [-]	1	2.43383	Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480
<b>V30F21700dT500</b>	Случај:	<b>3029</b>																																																																							
$P_a - P_e$ [Pa]		-276.939																																																																							
III [%]		79.946																																																																							
$U_{max}$ [m/s]		38.9733																																																																							
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.0552229 / 0.05531																																																																							
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.055666 / -0.05567																																																																							
$P_{min}$ [Pa]		-719.616																																																																							
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.362e8 / 0.258e9																																																																							
FA (max / min) [°]	71.5461	108.544																																																																							
ELR (max / min) [-]	1.00442	2.87528																																																																							
EVR (max / min) [-]	1	1.93854																																																																							
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480																																																																							
<b>V30F31700</b>	Случај:	<b>3030</b>																																																																							
$P_a - P_e$ [Pa]		-225.6																																																																							
III [%]		85.4927																																																																							
$U_{max}$ [m/s]		40.7761																																																																							
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.101945 / 0.10194																																																																							
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.106024 / -0.010602																																																																							
$P_{min}$ [Pa]		-762.298																																																																							
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		3.01																																																																							
FA (max / min) [°]	48.4483	119.938																																																																							
ELR (max / min) [-]	1.00052	3.86459																																																																							
EVR (max / min) [-]	1	2.43383																																																																							
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480																																																																							
<table border="1"> <tr> <td><b>V30F31700dT10</b></td> <td>Случај:</td> <td><b>3031</b></td> </tr> <tr> <td><math>P_a - P_e</math> [Pa]</td> <td></td> <td>224.61</td> </tr> <tr> <td>III [%]</td> <td></td> <td>78.4427</td> </tr> <tr> <td><math>U_{max}</math> [m/s]</td> <td></td> <td>40.9499</td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>0.102573 / 0.10250</td> </tr> <tr> <td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>-0.106667 / 0.10654</td> </tr> <tr> <td><math>P_{min}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-772.499</td> </tr> <tr> <td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td> <td></td> <td>0.150e8 / 0.291e9</td> </tr> </table>  <table border="1"> <tr> <td>FA (max / min) [°]</td> <td>48.2058</td> <td>120.205</td> </tr> <tr> <td>ELR (max / min) [-]</td> <td>1.00044</td> <td>3.88194</td> </tr> <tr> <td>EVR (max / min) [-]</td> <td>1</td> <td>2.43932</td> </tr> <tr> <td>Number of Nodes: 5643</td> <td>Number of Elements: 4480</td> <td>Hexahedra: 4480</td> </tr> </table> <p>Case sa fak=3 u strukt i fak=2 u strujnom modelu MAX ELEMENT NUMBER = 3915      MAX NODE NUMBER = 12010</p>	<b>V30F31700dT10</b>	Случај:	<b>3031</b>	$P_a - P_e$ [Pa]		224.61	III [%]		78.4427	$U_{max}$ [m/s]		40.9499	$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.102573 / 0.10250	$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.106667 / 0.10654	$P_{min}$ [Pa]		-772.499	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.150e8 / 0.291e9	FA (max / min) [°]	48.2058	120.205	ELR (max / min) [-]	1.00044	3.88194	EVR (max / min) [-]	1	2.43932	Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480	<table border="1"> <tr> <td><b>V30F31700dT50</b></td> <td>Случај:</td> <td><b>3032</b></td> </tr> <tr> <td><math>P_a - P_e</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-230.818</td> </tr> <tr> <td>III [%]</td> <td></td> <td>78.8248</td> </tr> <tr> <td><math>U_{max}</math> [m/s]</td> <td></td> <td>40.1431</td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>0.0993311 / 0.9933</td> </tr> <tr> <td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>-0.103574 / -0.103523</td> </tr> <tr> <td><math>P_{min}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-716.825</td> </tr> <tr> <td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td> <td></td> <td>3.2</td> </tr> </table>  <table border="1"> <tr> <td>FA (max / min) [°]</td> <td>49.5958</td> <td>118.71</td> </tr> <tr> <td>ELR (max / min) [-]</td> <td>1.00014</td> <td>3.77661</td> </tr> <tr> <td>EVR (max / min) [-]</td> <td>1</td> <td>2.40358</td> </tr> <tr> <td>Number of Nodes: 5643</td> <td>Number of Elements: 4480</td> <td>Hexahedra: 4480</td> </tr> </table> <p>Gustina mreže strujnog prostora odgovara Fak=2 a ne Fak=3</p>	<b>V30F31700dT50</b>	Случај:	<b>3032</b>	$P_a - P_e$ [Pa]		-230.818	III [%]		78.8248	$U_{max}$ [m/s]		40.1431	$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.0993311 / 0.9933	$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.103574 / -0.103523	$P_{min}$ [Pa]		-716.825	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		3.2	FA (max / min) [°]	49.5958	118.71	ELR (max / min) [-]	1.00014	3.77661	EVR (max / min) [-]	1	2.40358	Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480
<b>V30F31700dT10</b>	Случај:	<b>3031</b>																																																																							
$P_a - P_e$ [Pa]		224.61																																																																							
III [%]		78.4427																																																																							
$U_{max}$ [m/s]		40.9499																																																																							
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.102573 / 0.10250																																																																							
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.106667 / 0.10654																																																																							
$P_{min}$ [Pa]		-772.499																																																																							
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.150e8 / 0.291e9																																																																							
FA (max / min) [°]	48.2058	120.205																																																																							
ELR (max / min) [-]	1.00044	3.88194																																																																							
EVR (max / min) [-]	1	2.43932																																																																							
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480																																																																							
<b>V30F31700dT50</b>	Случај:	<b>3032</b>																																																																							
$P_a - P_e$ [Pa]		-230.818																																																																							
III [%]		78.8248																																																																							
$U_{max}$ [m/s]		40.1431																																																																							
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.0993311 / 0.9933																																																																							
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.103574 / -0.103523																																																																							
$P_{min}$ [Pa]		-716.825																																																																							
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		3.2																																																																							
FA (max / min) [°]	49.5958	118.71																																																																							
ELR (max / min) [-]	1.00014	3.77661																																																																							
EVR (max / min) [-]	1	2.40358																																																																							
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480																																																																							

Табела П5 - наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 30\text{m/s}$

<table border="1"> <tr><td>V30F31700dT100</td><td>Случај:</td><td>3033</td></tr> <tr><td><math>P_{in} - P_{ex}</math> [Pa]</td><td></td><td>-241.799</td></tr> <tr><td>III [%]</td><td></td><td>78.3786</td></tr> <tr><td><math>u_{max}</math> [m/s]</td><td></td><td>40.023</td></tr> <tr><td><math>w_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>0.0960971 / 0.09610</td></tr> <tr><td><math>w_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>-0.0783285 / -0.07833</td></tr> <tr><td><math>P_{min}</math> [Pa]</td><td></td><td>-714.972</td></tr> <tr><td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td><td></td><td>3.30</td></tr> </table>   <table border="1"> <tr><td>EA (max / min) [°]</td><td>51.573</td><td>116.749</td></tr> <tr><td>ELR (max / min) [-]</td><td>1.00028</td><td>3.59652</td></tr> <tr><td>EVR (max / min) [-]</td><td>1</td><td>2.36861</td></tr> <tr><td>Number of Nodes: 5643</td><td>Number of Elements: 4480</td><td>Hexahedra: 4480</td></tr> <tr><td colspan="3">Gustina mreže strujnog prostora odgovara Fak=2 a ne Fak=3</td></tr> </table>	V30F31700dT100	Случај:	3033	$P_{in} - P_{ex}$ [Pa]		-241.799	III [%]		78.3786	$u_{max}$ [m/s]		40.023	$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.0960971 / 0.09610	$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.0783285 / -0.07833	$P_{min}$ [Pa]		-714.972	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		3.30	EA (max / min) [°]	51.573	116.749	ELR (max / min) [-]	1.00028	3.59652	EVR (max / min) [-]	1	2.36861	Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480	Gustina mreže strujnog prostora odgovara Fak=2 a ne Fak=3			<table border="1"> <tr><td>V30F31700dT200</td><td>Случај:</td><td>3034</td></tr> <tr><td><math>P_{in} - P_{ex}</math> [Pa]</td><td></td><td>-248.12</td></tr> <tr><td>III [%]</td><td></td><td>76.3998</td></tr> <tr><td><math>u_{max}</math> [m/s]</td><td></td><td>40.9464</td></tr> <tr><td><math>w_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>0.071602 / 0.0711099</td></tr> <tr><td><math>w_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>-0.072192 / -0.0721921</td></tr> <tr><td><math>P_{min}</math> [Pa]</td><td></td><td>-765.864</td></tr> <tr><td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td><td></td><td>3.35</td></tr> </table>   <table border="1"> <tr><td>EA (max / min) [°]</td><td>59.6948</td><td>112.175</td></tr> <tr><td>ELR (max / min) [-]</td><td>1.00096</td><td>3.32391</td></tr> <tr><td>EVR (max / min) [-]</td><td>1</td><td>2.25846</td></tr> <tr><td>Number of Nodes: 5643</td><td>Number of Elements: 4480</td><td>Hexahedra: 4480</td></tr> <tr><td colspan="3">Gustina mreže strujnog prostora odgovara Fak=2 a ne Fak=3</td></tr> </table>	V30F31700dT200	Случај:	3034	$P_{in} - P_{ex}$ [Pa]		-248.12	III [%]		76.3998	$u_{max}$ [m/s]		40.9464	$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.071602 / 0.0711099	$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.072192 / -0.0721921	$P_{min}$ [Pa]		-765.864	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		3.35	EA (max / min) [°]	59.6948	112.175	ELR (max / min) [-]	1.00096	3.32391	EVR (max / min) [-]	1	2.25846	Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480	Gustina mreže strujnog prostora odgovara Fak=2 a ne Fak=3		
V30F31700dT100	Случај:	3033																																																																													
$P_{in} - P_{ex}$ [Pa]		-241.799																																																																													
III [%]		78.3786																																																																													
$u_{max}$ [m/s]		40.023																																																																													
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.0960971 / 0.09610																																																																													
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.0783285 / -0.07833																																																																													
$P_{min}$ [Pa]		-714.972																																																																													
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		3.30																																																																													
EA (max / min) [°]	51.573	116.749																																																																													
ELR (max / min) [-]	1.00028	3.59652																																																																													
EVR (max / min) [-]	1	2.36861																																																																													
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480																																																																													
Gustina mreže strujnog prostora odgovara Fak=2 a ne Fak=3																																																																															
V30F31700dT200	Случај:	3034																																																																													
$P_{in} - P_{ex}$ [Pa]		-248.12																																																																													
III [%]		76.3998																																																																													
$u_{max}$ [m/s]		40.9464																																																																													
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.071602 / 0.0711099																																																																													
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.072192 / -0.0721921																																																																													
$P_{min}$ [Pa]		-765.864																																																																													
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		3.35																																																																													
EA (max / min) [°]	59.6948	112.175																																																																													
ELR (max / min) [-]	1.00096	3.32391																																																																													
EVR (max / min) [-]	1	2.25846																																																																													
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480																																																																													
Gustina mreže strujnog prostora odgovara Fak=2 a ne Fak=3																																																																															
<table border="1"> <tr><td>V30F31700dT300</td><td>Случај:</td><td>3035</td></tr> <tr><td><math>P_{in} - P_{ex}</math> [Pa]</td><td></td><td>-193.995</td></tr> <tr><td>III [%]</td><td></td><td>74.1061</td></tr> <tr><td><math>u_{max}</math> [m/s]</td><td></td><td>47.441</td></tr> <tr><td><math>w_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>0.06558 / 0.0654527</td></tr> <tr><td><math>w_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>-0.06632 / -0.0663157</td></tr> <tr><td><math>P_{min}</math> [Pa]</td><td></td><td>-831.995</td></tr> <tr><td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td><td></td><td>3.38</td></tr> </table>   <table border="1"> <tr><td>EA (max / min) [°]</td><td>64.6351</td><td>109.306</td></tr> <tr><td>ELR (max / min) [-]</td><td>1.00203</td><td>3.42106</td></tr> <tr><td>EVR (max / min) [-]</td><td>1</td><td>2.17336</td></tr> <tr><td>Number of Nodes: 5643</td><td>Number of Elements: 4480</td><td>Hexahedra: 4480</td></tr> <tr><td colspan="3">Gustina mreže strujnog prostora odgovara Fak=2 a ne Fak=3</td></tr> </table>	V30F31700dT300	Случај:	3035	$P_{in} - P_{ex}$ [Pa]		-193.995	III [%]		74.1061	$u_{max}$ [m/s]		47.441	$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.06558 / 0.0654527	$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.06632 / -0.0663157	$P_{min}$ [Pa]		-831.995	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		3.38	EA (max / min) [°]	64.6351	109.306	ELR (max / min) [-]	1.00203	3.42106	EVR (max / min) [-]	1	2.17336	Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480	Gustina mreže strujnog prostora odgovara Fak=2 a ne Fak=3			<table border="1"> <tr><td>V30F1717363dT142</td><td>Случај:</td><td>3036</td></tr> <tr><td><math>P_{in} - P_{ex}</math> [Pa]</td><td></td><td>-243.168</td></tr> <tr><td>III [%]</td><td></td><td>80.8283</td></tr> <tr><td><math>u_{max}</math> [m/s]</td><td></td><td>41.0793</td></tr> <tr><td><math>w_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>0.04909 / 0.0490938</td></tr> <tr><td><math>w_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>-0.049167 / -0.0491673</td></tr> <tr><td><math>P_{min}</math> [Pa]</td><td></td><td>-629.179</td></tr> <tr><td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td><td></td><td>0.287E+09 / 0.193E+08</td></tr> </table>   <table border="1"> <tr><td>EA (max / min) [°]</td><td>71.8639</td><td>108.664</td></tr> <tr><td>ELR (max / min) [-]</td><td>1.02385</td><td>3.43061</td></tr> <tr><td>EVR (max / min) [-]</td><td>1</td><td>2.36282</td></tr> <tr><td>Number of Nodes: 3920</td><td>Number of Elements: 3024</td><td>Hexahedra: 3024</td></tr> </table>	V30F1717363dT142	Случај:	3036	$P_{in} - P_{ex}$ [Pa]		-243.168	III [%]		80.8283	$u_{max}$ [m/s]		41.0793	$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.04909 / 0.0490938	$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.049167 / -0.0491673	$P_{min}$ [Pa]		-629.179	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.287E+09 / 0.193E+08	EA (max / min) [°]	71.8639	108.664	ELR (max / min) [-]	1.02385	3.43061	EVR (max / min) [-]	1	2.36282	Number of Nodes: 3920	Number of Elements: 3024	Hexahedra: 3024			
V30F31700dT300	Случај:	3035																																																																													
$P_{in} - P_{ex}$ [Pa]		-193.995																																																																													
III [%]		74.1061																																																																													
$u_{max}$ [m/s]		47.441																																																																													
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.06558 / 0.0654527																																																																													
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.06632 / -0.0663157																																																																													
$P_{min}$ [Pa]		-831.995																																																																													
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		3.38																																																																													
EA (max / min) [°]	64.6351	109.306																																																																													
ELR (max / min) [-]	1.00203	3.42106																																																																													
EVR (max / min) [-]	1	2.17336																																																																													
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480																																																																													
Gustina mreže strujnog prostora odgovara Fak=2 a ne Fak=3																																																																															
V30F1717363dT142	Случај:	3036																																																																													
$P_{in} - P_{ex}$ [Pa]		-243.168																																																																													
III [%]		80.8283																																																																													
$u_{max}$ [m/s]		41.0793																																																																													
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.04909 / 0.0490938																																																																													
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.049167 / -0.0491673																																																																													
$P_{min}$ [Pa]		-629.179																																																																													
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.287E+09 / 0.193E+08																																																																													
EA (max / min) [°]	71.8639	108.664																																																																													
ELR (max / min) [-]	1.02385	3.43061																																																																													
EVR (max / min) [-]	1	2.36282																																																																													
Number of Nodes: 3920	Number of Elements: 3024	Hexahedra: 3024																																																																													
<table border="1"> <tr><td>V30F121426dT175</td><td>Случај:</td><td>3037</td></tr> <tr><td><math>P_{in} - P_{ex}</math> [Pa]</td><td></td><td>-273.648</td></tr> <tr><td>III [%]</td><td></td><td>83.0509</td></tr> <tr><td><math>u_{max}</math> [m/s]</td><td></td><td>40.6804</td></tr> <tr><td><math>w_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>0.06837 / 0.0683701</td></tr> <tr><td><math>w_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>-0.061603 / -0.0616027</td></tr> <tr><td><math>P_{min}</math> [Pa]</td><td></td><td>-642.989</td></tr> <tr><td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td><td></td><td>0.277E+09 / 0.196E+08</td></tr> </table>   <table border="1"> <tr><td>EA (max / min) [°]</td><td>70.8617</td><td>107.4</td></tr> <tr><td>ELR (max / min) [-]</td><td>1.12982</td><td>2.3922</td></tr> <tr><td>EVR (max / min) [-]</td><td>1</td><td>1.63672</td></tr> <tr><td>Number of Nodes: 1225</td><td>Number of Elements: 816</td><td>Hexahedra: 816</td></tr> </table>	V30F121426dT175	Случај:	3037	$P_{in} - P_{ex}$ [Pa]		-273.648	III [%]		83.0509	$u_{max}$ [m/s]		40.6804	$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.06837 / 0.0683701	$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.061603 / -0.0616027	$P_{min}$ [Pa]		-642.989	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.277E+09 / 0.196E+08	EA (max / min) [°]	70.8617	107.4	ELR (max / min) [-]	1.12982	2.3922	EVR (max / min) [-]	1	1.63672	Number of Nodes: 1225	Number of Elements: 816	Hexahedra: 816	<table border="1"> <tr><td>V30F217555dT238</td><td>Случај:</td><td>3038</td></tr> <tr><td><math>P_{in} - P_{ex}</math> [Pa]</td><td></td><td>-233.087</td></tr> <tr><td>III [%]</td><td></td><td>76.3524</td></tr> <tr><td><math>u_{max}</math> [m/s]</td><td></td><td>43.6316</td></tr> <tr><td><math>w_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>0.08463 / 0.084634</td></tr> <tr><td><math>w_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>-0.058541 / -0.0585413</td></tr> <tr><td><math>P_{min}</math> [Pa]</td><td></td><td>-738.628</td></tr> <tr><td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td><td></td><td>0.313E+09 / 0.275E+08</td></tr> </table>   <table border="1"> <tr><td>EA (max / min) [°]</td><td>69.3269</td><td>106.146</td></tr> <tr><td>ELR (max / min) [-]</td><td>1.00011</td><td>3.1478</td></tr> <tr><td>EVR (max / min) [-]</td><td>1</td><td>2.16349</td></tr> <tr><td>Number of Nodes: 5940</td><td>Number of Elements: 4720</td><td>Hexahedra: 4720</td></tr> </table>	V30F217555dT238	Случај:	3038	$P_{in} - P_{ex}$ [Pa]		-233.087	III [%]		76.3524	$u_{max}$ [m/s]		43.6316	$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.08463 / 0.084634	$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.058541 / -0.0585413	$P_{min}$ [Pa]		-738.628	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.313E+09 / 0.275E+08	EA (max / min) [°]	69.3269	106.146	ELR (max / min) [-]	1.00011	3.1478	EVR (max / min) [-]	1	2.16349	Number of Nodes: 5940	Number of Elements: 4720	Hexahedra: 4720						
V30F121426dT175	Случај:	3037																																																																													
$P_{in} - P_{ex}$ [Pa]		-273.648																																																																													
III [%]		83.0509																																																																													
$u_{max}$ [m/s]		40.6804																																																																													
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.06837 / 0.0683701																																																																													
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.061603 / -0.0616027																																																																													
$P_{min}$ [Pa]		-642.989																																																																													
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.277E+09 / 0.196E+08																																																																													
EA (max / min) [°]	70.8617	107.4																																																																													
ELR (max / min) [-]	1.12982	2.3922																																																																													
EVR (max / min) [-]	1	1.63672																																																																													
Number of Nodes: 1225	Number of Elements: 816	Hexahedra: 816																																																																													
V30F217555dT238	Случај:	3038																																																																													
$P_{in} - P_{ex}$ [Pa]		-233.087																																																																													
III [%]		76.3524																																																																													
$u_{max}$ [m/s]		43.6316																																																																													
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.08463 / 0.084634																																																																													
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.058541 / -0.0585413																																																																													
$P_{min}$ [Pa]		-738.628																																																																													
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.313E+09 / 0.275E+08																																																																													
EA (max / min) [°]	69.3269	106.146																																																																													
ELR (max / min) [-]	1.00011	3.1478																																																																													
EVR (max / min) [-]	1	2.16349																																																																													
Number of Nodes: 5940	Number of Elements: 4720	Hexahedra: 4720																																																																													
<table border="1"> <tr><td>V30F151642dT417</td><td>Случај:</td><td>3039</td></tr> <tr><td><math>P_{in} - P_{ex}</math> [Pa]</td><td></td><td>-55.504</td></tr> <tr><td>III [%]</td><td></td><td>68.7892</td></tr> <tr><td><math>u_{max}</math> [m/s]</td><td></td><td>52.6029</td></tr> <tr><td><math>w_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>0.056493 / 0.0564931</td></tr> <tr><td><math>w_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>-0.056535 / -0.0565351</td></tr> <tr><td><math>P_{min}</math> [Pa]</td><td></td><td>-957.028</td></tr> <tr><td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td><td></td><td>0.267E+09 / 0.255E+08</td></tr> </table>   <table border="1"> <tr><td>EA (max / min) [°]</td><td>72.9331</td><td>107.703</td></tr> <tr><td>ELR (max / min) [-]</td><td>1.01343</td><td>4.97595</td></tr> <tr><td>EVR (max / min) [-]</td><td>1</td><td>2.89606</td></tr> <tr><td>Number of Nodes: 3096</td><td>Number of Elements: 2352</td><td>Hexahedra: 2352</td></tr> </table>	V30F151642dT417	Случај:	3039	$P_{in} - P_{ex}$ [Pa]		-55.504	III [%]		68.7892	$u_{max}$ [m/s]		52.6029	$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.056493 / 0.0564931	$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.056535 / -0.0565351	$P_{min}$ [Pa]		-957.028	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.267E+09 / 0.255E+08	EA (max / min) [°]	72.9331	107.703	ELR (max / min) [-]	1.01343	4.97595	EVR (max / min) [-]	1	2.89606	Number of Nodes: 3096	Number of Elements: 2352	Hexahedra: 2352	<table border="1"> <tr><td>V30F21500dT20</td><td>Случај:</td><td>3040</td></tr> <tr><td><math>P_{in} - P_{ex}</math> [Pa]</td><td></td><td>-241.535</td></tr> <tr><td>III [%]</td><td></td><td>82.408</td></tr> <tr><td><math>u_{max}</math> [m/s]</td><td></td><td>40.9259</td></tr> <tr><td><math>w_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>0.080437 / 0.080437</td></tr> <tr><td><math>w_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td><td></td><td>-0.083879 / -0.0838789</td></tr> <tr><td><math>P_{min}</math> [Pa]</td><td></td><td>-604.977</td></tr> <tr><td><math>\sigma_{von Mises}</math> max/min [N/m<sup>2</sup>]</td><td></td><td>0.309E+09 / 0.186E+08</td></tr> </table>   <table border="1"> <tr><td>EA (max / min) [°]</td><td>60.6276</td><td>111.413</td></tr> <tr><td>ELR (max / min) [-]</td><td>1.00204</td><td>3.09126</td></tr> <tr><td>EVR (max / min) [-]</td><td>1</td><td>2.25842</td></tr> <tr><td>Number of Nodes: 5643</td><td>Number of Elements: 4480</td><td>Hexahedra: 4480</td></tr> </table>	V30F21500dT20	Случај:	3040	$P_{in} - P_{ex}$ [Pa]		-241.535	III [%]		82.408	$u_{max}$ [m/s]		40.9259	$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.080437 / 0.080437	$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.083879 / -0.0838789	$P_{min}$ [Pa]		-604.977	$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.309E+09 / 0.186E+08	EA (max / min) [°]	60.6276	111.413	ELR (max / min) [-]	1.00204	3.09126	EVR (max / min) [-]	1	2.25842	Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480						
V30F151642dT417	Случај:	3039																																																																													
$P_{in} - P_{ex}$ [Pa]		-55.504																																																																													
III [%]		68.7892																																																																													
$u_{max}$ [m/s]		52.6029																																																																													
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.056493 / 0.0564931																																																																													
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.056535 / -0.0565351																																																																													
$P_{min}$ [Pa]		-957.028																																																																													
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.267E+09 / 0.255E+08																																																																													
EA (max / min) [°]	72.9331	107.703																																																																													
ELR (max / min) [-]	1.01343	4.97595																																																																													
EVR (max / min) [-]	1	2.89606																																																																													
Number of Nodes: 3096	Number of Elements: 2352	Hexahedra: 2352																																																																													
V30F21500dT20	Случај:	3040																																																																													
$P_{in} - P_{ex}$ [Pa]		-241.535																																																																													
III [%]		82.408																																																																													
$u_{max}$ [m/s]		40.9259																																																																													
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.080437 / 0.080437																																																																													
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.083879 / -0.0838789																																																																													
$P_{min}$ [Pa]		-604.977																																																																													
$\sigma_{von Mises}$ max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.309E+09 / 0.186E+08																																																																													
EA (max / min) [°]	60.6276	111.413																																																																													
ELR (max / min) [-]	1.00204	3.09126																																																																													
EVR (max / min) [-]	1	2.25842																																																																													
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480																																																																													

Табела П5 - наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 30\text{m/s}$

<b>V30F14T700dT627</b>	Случај:	<b>3041</b>			
$P_{02} - P_{01}$ [Pa]		-233.353			
$\Delta H$ [%]		70.9192			
$u_{max}$ [m/s]		46.2848			
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.052026 / 0.0520257			
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.052074 / -0.052074			
$P_{min}$ [Pa]		-914.267			
$\sigma_{min}$ Mises max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.262E+09 / 0.952E+08			
					
FA (max / min) [°]	70.3399	114.679			
ELR (max / min) [-]	1.02877	3.6095			
EVR (max / min) [-]	1	1.92967			
Number of Nodes: 1920	Number of Elements: 1365	Hexahedra: 1365			
<b>V30F2T300dT50</b>	Случај:	<b>3042</b>			
$P_{02} - P_{01}$ [Pa]		-254.938			
$\Delta H$ [%]		85.0957			
$u_{max}$ [m/s]		39.5383			
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.053708 / 0.0537082			
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.051114 / -0.0511138			
$P_{min}$ [Pa]		-545.242			
$\sigma_{min}$ Mises max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.296E+09 / 0.128E+08			
					
FA (max / min) [°]	74.1122	105.828			
ELR (max / min) [-]	1.00468	2.76386			
EVR (max / min) [-]	1	2.0243			
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480			
<b>V30F1T300dT200</b>	Случај:	<b>3043</b>			
$P_{02} - P_{01}$ [Pa]		-268.937			
$\Delta H$ [%]		78.9855			
$u_{max}$ [m/s]		42.2658			
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.039419 / 0.0394194			
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.039496 / -0.0394955			
$P_{min}$ [Pa]		-708.486			
$\sigma_{min}$ Mises max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.243E+09 / 0.309E+08			
					
FA (max / min) [°]	76.2544	102.404			
ELR (max / min) [-]	1.006	2.98761			
EVR (max / min) [-]	1	1.83417			
Number of Nodes: 870	Number of Elements: 560	Hexahedra: 560			
<b>V30F1T700dT150</b>	Случај:	<b>3044</b>			
$P_{02} - P_{01}$ [Pa]		-248.367			
$\Delta H$ [%]		80.1247			
$u_{max}$ [m/s]		42.5874			
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.098354 / 0.0983544			
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.102639 / -0.102639			
$P_{min}$ [Pa]		-721.891			
$\sigma_{min}$ Mises max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.266E+09 / 0.268E+08			
					
FA (max / min) [°]	59.7245	113.429			
ELR (max / min) [-]	1.00057	3.18494			
EVR (max / min) [-]	1	2.44217			
Number of Nodes: 870	Number of Elements: 560	Hexahedra: 560			
<b>V30F1T700dT200</b>	Случај:	<b>3045</b>			
$P_{02} - P_{01}$ [Pa]		-244.877			
$\Delta H$ [%]		75.6958			
$u_{max}$ [m/s]		44.4088			
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.07346 / 0.0734596			
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.073536 / -0.0735361			
$P_{min}$ [Pa]		-831.709			
$\sigma_{min}$ Mises max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.253E+09 / 0.265E+08			
					
FA (max / min) [°]	69.0601	108.728			
ELR (max / min) [-]	1.00155	3.34922			
EVR (max / min) [-]	1	2.20179			
Number of Nodes: 870	Number of Elements: 560	Hexahedra: 560			
<b>V30F12T327dT285</b>	Случај:	<b>3046</b>			
$P_{02} - P_{01}$ [Pa]		-267.963			
$\Delta H$ [%]		79.4028			
$u_{max}$ [m/s]		41.9993			
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.037888 / 0.0378878			
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.037968 / -0.037968			
$P_{min}$ [Pa]		-682.999			
$\sigma_{min}$ Mises max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.245E+09 / 0.300E+08			
					
FA (max / min) [°]	76.2226	102.639			
ELR (max / min) [-]	1.13664	2.41698			
EVR (max / min) [-]	1	1.32781			
Number of Nodes: 1225	Number of Elements: 816	Hexahedra: 816			
<b>V30F12T473dT392</b>	Случај:	<b>3047</b>			
$P_{02} - P_{01}$ [Pa]		-251.77			
$\Delta H$ [%]		74.3319			
$u_{max}$ [m/s]		44.7175			
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.046175 / 0.0461747			
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.046216 / -0.0462161			
$P_{min}$ [Pa]		-817.278			
$\sigma_{min}$ Mises max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.249E+09 / 0.256E+08			
					
FA (max / min) [°]	74.7554	104.425			
ELR (max / min) [-]	1.12107	2.66506			
EVR (max / min) [-]	1	1.37364			
Number of Nodes: 1225	Number of Elements: 816	Hexahedra: 816			
<b>V30F14T568dT446</b>	Случај:	<b>3048</b>			
$P_{02} - P_{01}$ [Pa]		-241.512			
$\Delta H$ [%]		71.736			
$u_{max}$ [m/s]		45.9347			
$w_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.051085 / 0.0510846			
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.051131 / -0.0511306			
$P_{min}$ [Pa]		-897.765			
$\sigma_{min}$ Mises max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.252E+09 / 0.704E+07			
					
FA (max / min) [°]	70.5273	114.42			
ELR (max / min) [-]	1.02901	3.56371			
EVR (max / min) [-]	1	1.92072			
Number of Nodes: 1920	Number of Elements: 1365	Hexahedra: 1365			

Табела П5 - наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 30\text{m/s}$

<table border="1"> <tr> <td><b>V30F14T671dT525</b></td> <td>Случај:</td> <td><b>3049</b></td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>P_{02} - P_{01}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-228.55</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ДП [%]</td> <td></td> <td>69.5709</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m/s]</td> <td></td> <td>47.2951</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>0.05472 / 0.0547203</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>-0.0547766 / -0.05477664</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>P_{min}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-367.635</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>\sigma_{max}</math> Мисио: max/min [N/m<sup>2</sup>]</td> <td></td> <td>0.255E+09 / 0.367E+08</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="4"> </td> </tr> <tr> <td>FA (max / min) [°]</td> <td></td> <td>70.2671</td> <td>115.351</td> </tr> <tr> <td>ELR (max / min) [-]</td> <td></td> <td>1.0244</td> <td>3.73856</td> </tr> <tr> <td>EVR (max / min) [-]</td> <td></td> <td>1</td> <td>1.93474</td> </tr> <tr> <td>Number of Nodes: 1920</td> <td>Number of Elements: 1365</td> <td colspan="2">Hexahedra: 1365</td> </tr> </table>	<b>V30F14T671dT525</b>	Случај:	<b>3049</b>		$P_{02} - P_{01}$ [Pa]		-228.55		ДП [%]		69.5709		$W_{max}$ [m/s]		47.2951		$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.05472 / 0.0547203		$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.0547766 / -0.05477664		$P_{min}$ [Pa]		-367.635		$\sigma_{max}$ Мисио: max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.255E+09 / 0.367E+08						FA (max / min) [°]		70.2671	115.351	ELR (max / min) [-]		1.0244	3.73856	EVR (max / min) [-]		1	1.93474	Number of Nodes: 1920	Number of Elements: 1365	Hexahedra: 1365		<table border="1"> <tr> <td><b>V30F21170dT50</b></td> <td>Случај:</td> <td><b>3050</b></td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>P_{02} - P_{01}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-307.907</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ДП [%]</td> <td></td> <td>85.7626</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m/s]</td> <td></td> <td>36.1211</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>0.032381 / 0.032381</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>-0.032484 / -0.0324841</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>P_{min}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-583.445</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>\sigma_{max}</math> Мисио: max/min [N/m<sup>2</sup>]</td> <td></td> <td>0.264 E+09 / 0.110E+08</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="4"> </td> </tr> <tr> <td>FA (max / min) [°]</td> <td></td> <td>79.379</td> <td>100.6</td> </tr> <tr> <td>ELR (max / min) [-]</td> <td></td> <td>1.00442</td> <td>2.6672</td> </tr> <tr> <td>EVR (max / min) [-]</td> <td></td> <td>1</td> <td>1.85492</td> </tr> <tr> <td>Number of Nodes: 5643</td> <td>Number of Elements: 4480</td> <td colspan="2">Hexahedra: 4480</td> </tr> </table>	<b>V30F21170dT50</b>	Случај:	<b>3050</b>		$P_{02} - P_{01}$ [Pa]		-307.907		ДП [%]		85.7626		$W_{max}$ [m/s]		36.1211		$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.032381 / 0.032381		$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.032484 / -0.0324841		$P_{min}$ [Pa]		-583.445		$\sigma_{max}$ Мисио: max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.264 E+09 / 0.110E+08						FA (max / min) [°]		79.379	100.6	ELR (max / min) [-]		1.00442	2.6672	EVR (max / min) [-]		1	1.85492	Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480	
<b>V30F14T671dT525</b>	Случај:	<b>3049</b>																																																																																																							
$P_{02} - P_{01}$ [Pa]		-228.55																																																																																																							
ДП [%]		69.5709																																																																																																							
$W_{max}$ [m/s]		47.2951																																																																																																							
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.05472 / 0.0547203																																																																																																							
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.0547766 / -0.05477664																																																																																																							
$P_{min}$ [Pa]		-367.635																																																																																																							
$\sigma_{max}$ Мисио: max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.255E+09 / 0.367E+08																																																																																																							
FA (max / min) [°]		70.2671	115.351																																																																																																						
ELR (max / min) [-]		1.0244	3.73856																																																																																																						
EVR (max / min) [-]		1	1.93474																																																																																																						
Number of Nodes: 1920	Number of Elements: 1365	Hexahedra: 1365																																																																																																							
<b>V30F21170dT50</b>	Случај:	<b>3050</b>																																																																																																							
$P_{02} - P_{01}$ [Pa]		-307.907																																																																																																							
ДП [%]		85.7626																																																																																																							
$W_{max}$ [m/s]		36.1211																																																																																																							
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.032381 / 0.032381																																																																																																							
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.032484 / -0.0324841																																																																																																							
$P_{min}$ [Pa]		-583.445																																																																																																							
$\sigma_{max}$ Мисио: max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.264 E+09 / 0.110E+08																																																																																																							
FA (max / min) [°]		79.379	100.6																																																																																																						
ELR (max / min) [-]		1.00442	2.6672																																																																																																						
EVR (max / min) [-]		1	1.85492																																																																																																						
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480																																																																																																							
<table border="1"> <tr> <td><b>V30F21800dT300</b></td> <td>Случај:</td> <td><b>3051</b></td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>P_{02} - P_{01}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-232.791</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ДП [%]</td> <td></td> <td>73.32</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m/s]</td> <td></td> <td>42.7412</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>0.072687 / 0.0726872</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>-0.07375 / -0.073750</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>P_{min}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-844.323</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>\sigma_{max}</math> Мисио: max/min [N/m<sup>2</sup>]</td> <td></td> <td>0.301E+09 / 0.277E+08</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="4"> </td> </tr> <tr> <td>FA (max / min) [°]</td> <td></td> <td>61.1511</td> <td>111.496</td> </tr> <tr> <td>ELR (max / min) [-]</td> <td></td> <td>1.00089</td> <td>3.51904</td> </tr> <tr> <td>EVR (max / min) [-]</td> <td></td> <td>1</td> <td>2.25923</td> </tr> <tr> <td>Number of Nodes: 5643</td> <td>Number of Elements: 4480</td> <td colspan="2">Hexahedra: 4480</td> </tr> </table>	<b>V30F21800dT300</b>	Случај:	<b>3051</b>		$P_{02} - P_{01}$ [Pa]		-232.791		ДП [%]		73.32		$W_{max}$ [m/s]		42.7412		$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.072687 / 0.0726872		$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.07375 / -0.073750		$P_{min}$ [Pa]		-844.323		$\sigma_{max}$ Мисио: max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.301E+09 / 0.277E+08						FA (max / min) [°]		61.1511	111.496	ELR (max / min) [-]		1.00089	3.51904	EVR (max / min) [-]		1	2.25923	Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480		<table border="1"> <tr> <td><b>V30F21900dT600</b></td> <td>Случај:</td> <td><b>3052</b></td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>P_{02} - P_{01}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-203.903</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ДП [%]</td> <td></td> <td>65.5857</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m/s]</td> <td></td> <td>48.0596</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>W_{max}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>0.064007 / 0.064007</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>W_{min}</math> [m] (ANSYS / CFX)</td> <td></td> <td>-0.064715 / -0.0647144</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>P_{min}</math> [Pa]</td> <td></td> <td>-1110.4</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>\sigma_{max}</math> Мисио: max/min [N/m<sup>2</sup>]</td> <td></td> <td>0.274E+09 / 0.285E+08</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="4"> </td> </tr> <tr> <td>FA (max / min) [°]</td> <td></td> <td>69.8798</td> <td>110.394</td> </tr> <tr> <td>ELR (max / min) [-]</td> <td></td> <td>1.0035</td> <td>3.99547</td> </tr> <tr> <td>EVR (max / min) [-]</td> <td></td> <td>1</td> <td>2.03084</td> </tr> <tr> <td>Number of Nodes: 5643</td> <td>Number of Elements: 4480</td> <td colspan="2">Hexahedra: 4480</td> </tr> </table>	<b>V30F21900dT600</b>	Случај:	<b>3052</b>		$P_{02} - P_{01}$ [Pa]		-203.903		ДП [%]		65.5857		$W_{max}$ [m/s]		48.0596		$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.064007 / 0.064007		$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.064715 / -0.0647144		$P_{min}$ [Pa]		-1110.4		$\sigma_{max}$ Мисио: max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.274E+09 / 0.285E+08						FA (max / min) [°]		69.8798	110.394	ELR (max / min) [-]		1.0035	3.99547	EVR (max / min) [-]		1	2.03084	Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480	
<b>V30F21800dT300</b>	Случај:	<b>3051</b>																																																																																																							
$P_{02} - P_{01}$ [Pa]		-232.791																																																																																																							
ДП [%]		73.32																																																																																																							
$W_{max}$ [m/s]		42.7412																																																																																																							
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.072687 / 0.0726872																																																																																																							
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.07375 / -0.073750																																																																																																							
$P_{min}$ [Pa]		-844.323																																																																																																							
$\sigma_{max}$ Мисио: max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.301E+09 / 0.277E+08																																																																																																							
FA (max / min) [°]		61.1511	111.496																																																																																																						
ELR (max / min) [-]		1.00089	3.51904																																																																																																						
EVR (max / min) [-]		1	2.25923																																																																																																						
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480																																																																																																							
<b>V30F21900dT600</b>	Случај:	<b>3052</b>																																																																																																							
$P_{02} - P_{01}$ [Pa]		-203.903																																																																																																							
ДП [%]		65.5857																																																																																																							
$W_{max}$ [m/s]		48.0596																																																																																																							
$W_{max}$ [m] (ANSYS / CFX)		0.064007 / 0.064007																																																																																																							
$W_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		-0.064715 / -0.0647144																																																																																																							
$P_{min}$ [Pa]		-1110.4																																																																																																							
$\sigma_{max}$ Мисио: max/min [N/m <sup>2</sup> ]		0.274E+09 / 0.285E+08																																																																																																							
FA (max / min) [°]		69.8798	110.394																																																																																																						
ELR (max / min) [-]		1.0035	3.99547																																																																																																						
EVR (max / min) [-]		1	2.03084																																																																																																						
Number of Nodes: 5643	Number of Elements: 4480	Hexahedra: 4480																																																																																																							



Табела П5 - наставак: Резултати прорачуна за брзину на улазу  $V_{ul} = 30\text{m/s}$

<b>V30F13T436dT175</b> Случај: <b>3053</b>			<b>V30F20T517dT108</b> Случај: <b>3054</b>		
$P_{st} - P_{st}$ [Pa]			$P_{st} - P_{st}$ [Pa]		
79.2843			80.8073		
ДП [%]			ДП [%]		
41.7986			41.4791		
$w_{max}$ [m/s]			$w_{max}$ [m/s]		
0.052964 / 0.0529636			0.076436 / 0.0764365		
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)			$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		
-0.053029 / -0.0530295			-0.065115 / -0.0651148		
$P_{min}$ [Pa]			$P_{min}$ [Pa]		
-705.228			-630.552		
$\sigma_{min}$ Mises max/min [N/m <sup>2</sup> ]			$\sigma_{min}$ Mises max/min [N/m <sup>2</sup> ]		
0.276 E+09 / 0.315 E+08			0.318 E+09 / 0.109 E+08		
FA (max / min) [°]:			FA (max / min) [°]:		
70.4901			120.469		
ELR (max / min) [-]:			ELR (max / min) [-]:		
1.00575			3.50051		
EVR (max / min) [-]:			EVR (max / min) [-]:		
1			2.39152		
Number of Nodes: 1554			Number of Nodes: 5643		
Number of Elements: 1080			Number of Elements: 4480		
Hexahedra: 1080			Hexahedra: 4480		
<b>V30F30T348dT294</b> Случај: <b>3055</b>			<b>V30F10T170dT0</b> Случај: <b>3056</b>		
$P_{st} - P_{st}$ [Pa]			$P_{st} - P_{st}$ [Pa]		
-181.041			-288.61		
ДП [%]			ДП [%]		
78.9415			87.9838		
$w_{max}$ [m/s]			$w_{max}$ [m/s]		
42.2712			38.340		
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)			$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		
0.038622 / 0.0386224			0.040155 / 0.0401554		
$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)			$w_{min}$ [m] (ANSYS / CFX)		
-0.038683 / -0.0386831			-0.040246 / -0.0402459		
$P_{min}$ [Pa]			$P_{min}$ [Pa]		
-604.162			-544.753		
$\sigma_{min}$ Mises max/min [N/m <sup>2</sup> ]			$\sigma_{min}$ Mises max/min [N/m <sup>2</sup> ]		
0.256 E+09 / 0.239 E+08			0.249 E+09 / 0.261 E+08		
FA (max / min) [°]:			FA (max / min) [°]:		
75.4119			104.375		
ELR (max / min) [-]:			ELR (max / min) [-]:		
1.00274			2.97804		
EVR (max / min) [-]:			EVR (max / min) [-]:		
1			1.79745		
Number of Nodes: 17680			Number of Nodes: 870		
Number of Elements: 15120			Number of Elements: 560		
Hexahedra: 15120			Hexahedra: 560		

## Биографски подаци о аутору

<b>Основни подаци</b>	Име, Презиме: <b>Зоран Марковић</b> Титула, звање: <b>Магистар машинства, истраживач-сарадник</b> Адреса Институције: <b>Институт за нуклеарне науке “ВИНЧА”, Лабораторија за термотехнику и енергетику, п.фах 522, 11001 Београд, Србија</b>
<b>Лични подаци</b>	Датум и место рођења: <b>06.07.1968., Ваљево, Србија</b> Брачно стање: <b>ожењен, двоје деце.</b>
<b>Образовање</b>	Дипломске студије: <b>Машински факултет, Универзитет у Београду, Ваздухопловство</b> Последипломске студије: <b>Машински факултет, Универзитет у Београду, Ваздухопловство</b> Магистарски рад: <b>Одбрањен 01.07.2005.</b>
<b>Чланство у одборима</b>	- Члан организационог одбора међународне конференције “ЕЛЕКТРАНЕ 2010” и “ЕЛЕКТРАНЕ 2012”
<b>Истраживачк о искуство</b>	Посао бр. 1: <b>истраживач приправник</b> Период: <b>2001 - 2005</b> Институција: <b>Београдски Универзитет, Институт за нуклеарне науке “ВИНЧА”, Лабораторија за термотехнику и енергетику.</b>  Посао бр. 2: <b>истраживач сарадник</b> Период: <b>2005 - 2006</b> Институција: <b>Београдски Универзитет, Институт за нуклеарне науке “ВИНЧА”, Лабораторија за термотехнику и енергетику,</b>  Посао бр. 3: <b>Руководилац метролошке лабораторије</b> Период: <b>2007 - 2010</b> Институција: <b>WKA Мерна техника, Београд</b>  Посао бр. 4: <b>истраживач сарадник</b> Период: <b>2010 - данас</b> Институција: <b>Београдски Универзитет, Институт за нуклеарне науке “ВИНЧА”, Лабораторија за термотехнику и енергетику,</b>  Области активности: <ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Плазма технологије за употребу на термоенергетским постројењима</b></li><li>• <b>Оптимизација и повећање ефикасности термоенергетских постројења на спрашени угаљ</b></li><li>• <b>Комплексни системи за аквизицију и мониторинг на термоенергетским постројењима</b></li><li>• <b>Комплексна мерења емисије штетних материја из термоелектрана</b></li><li>• <b>Нумеричких анализа структура</b></li><li>• <b>Нумеричка механика флуида</b></li></ul>
<b>Међународна сарадња</b>	<b>Training Course of Renewable Energy u okviru China TCDC Technical Training Course programa koji se održavao u NR Kini od 26.07.-08.09. 2004.</b> <b>SEE-ERA.NET Plus Joint Call PROJECT. project no. SEE ERA PLUS-093: "Supporting Common RTD actions in WBCs for developing Low Cost and Low Risk ICT based solutions for TPPs Energy Efficiency increasing (WBalkICT)", партиципант 2010-2013</b>
<b>Научни Пројекти</b>	Пројекат: <b>TR-33050, “Побољшање квалитета и технологије сагоревања домаћих лигнита у циљу повећања енергетске ефикасности и смањења емисије штетних материја из термоелектрана ЈП Електропривреда Србије”, 2010 -</b> Институција: <b>Институт за нуклеарне науке “ВИНЧА”, Лабораторија за терм. и енергет.</b>

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани-а мр Зоран Марковић

број индекса \_\_\_\_\_

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

НУМЕРИЧКА АНАЛИЗА ИНТЕРАКЦИЈЕ ФЛУИДА И ТАНКОЗИДНЕ СТРУКТУРЕ  
ЗАТВОРЕНЕ КОНТУРЕ

---

---

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис

докторанда

У Београду, 29.07.2016.

Зоран Марковић

Прилог 2.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора мр Зоран Марковић

Број индекса \_\_\_\_\_

Студијски програм докторске студије

Наслов рада Нумеричка анализа интеракције флуида и танкозидне структуре затворене контуре

Ментор проф др Слободан Ступар, Универзитет у Београду, Машински факултет

Потписани/а мр Зоран Марковић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 29.07.2016.

Зоран Марковић

Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

НУМЕРИЧКА АНАЛИЗА ИНТЕРАКЦИЈЕ ФЛУИДА И СТРУКТУРЕ ЗАТВОРЕНЕ

---

КОНТУРЕ

---

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

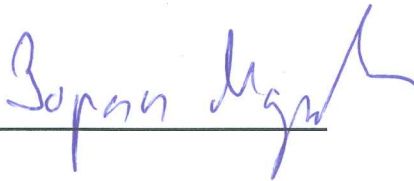
Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 29.07.2016.

  
\_\_\_\_\_

1. Ауторство - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.