

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Зорана Б. Тривковић

**ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКА  
ОПТИМИЗАЦИЈА КОМПОЗИТНИХ  
ЛОПАТИЦА ВЕТРОТУРБИНА**

докторска дисертација

Београд, 2019.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Zorana B. Trivković

**MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION OF  
COMPOSITE WIND TURBINE BLADES**

doctoral dissertation

Belgrade, 2019.

Подаци о ментору и члановима комисије за преглед и одбрану:

Ментор:

др Огњен Пековић, доцент  
Универзитет у Београду, Машински факултет

Чланови комисије:

др Часлав Митровић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Небојша Петровић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Александар Симоновић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Никола Мирков, научни сарадник  
Институт за нуклеарне науке Винча, Београд

Датум одбране: \_\_\_\_\_ 2019.

## ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКА ОПТИМИЗАЦИЈА КОМПОЗИТНИХ ЛОПАТИЦА ВЕТРОТУРБИНА

### Резиме

Предмет истраживања ове докторске дисертације је ротор Даријусове ветротурбине који се састоји од три равне лопатице. Циљ истраживања је развијање методологије прорачуна и оптимизације помоћу које се брзо и једноставно може успоставити побољшани прелиминарни дизајн ветротурбине са вертикалном осом обртања.

Иако је начелно једноставне конструкције, анализа ове ветротурбине укључује изузетно комплексну аеродинамичку слику. Опструјавање ротора при различитим радним режимима је разматрано како тродимензионално – аеродинамички прорачун је извршен моделом прорачунске механике флуида. Даље, развијен је параметризовани структурни модел лопатице. Резултати спроведеног аеродинамичког прорачуна, структурни модел и метод прорачуна (МКЕ) су искоришћени за оптимизацију дефинисаних параметара структуре лопатице (броја  $n$  и оријентације  $\theta_i$  слојева ламинатне структуре композитне лопатице). Као метод оптимизације изабрана је оптимизација ројем честица. За спровођење целог поступка развијен је сопствени код.

Детаљном анализом добијеног скупа решења изабран је одговарајући модел лопатице који је и реализован поступком мокрог ређања платана. Експерименталним испитивањима, методама мерних трака и дигиталне корелације слика, израђене лопатице ламинатне композитне структуре добијени су резултати који валидирају претходну нумеричку поставку.

**Кључне речи:** ветротурбине са вертикалном осом обртања, композитне лопатице, прорачунска механика флуида, оптимизација ројем честица, метода коначних елемената, метода коначних запремина, оптимизације структуре, експеримент, производња лопатица

**Научна област:** Машинство

**Ужа научна област:** Ваздухопловство

**УДК:** 621.548.5:533.69:[004.942:519.62/.63(043.3)

621.548.5:533.69.04]:004.942(043.3)

533.662:66.018.9]:620.162:004.932(043.3)

# **MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION OF COMPOSITE WIND TURBINE BLADES**

## **Abstract**

Topic of this doctoral dissertation is Darrieus wind turbine rotor which contains three straight blades. Research goal is the development of methodology of computation and optimization that enables fast and simple definition of improved preliminary redesign of vertical axis wind turbine.

Although the rotor geometry is simple, its aerodynamic analysis is quite complex. Fluid flow around wind turbine at different tip speed ratios has been considered three-dimensional. Aerodynamic computation has been performed by CFD methods. Furthermore, a parametric structural blade model has been developed. The results of the conducted aerodynamic simulations, the structural model and the FEM model have been used to optimize the chosen parameters of the blade structure (ply number and ply lay-up of the composite blade). Optimizations have been performed by particle swarm method. The whole procedure has been realized by an in-house code.

Detailed analysis of obtained Pareto sets resulted in most suitable blade model that was manufactured by wet hand lay-up procedure. Through experimental testing of the produced laminate composite blade, by strain gauges and digital image correlation system, the previously developed numerical framework has been validated.

**Key words:** vertical axis wind turbine, composite blade, CFD, PSO, FEM, FVM, structural optimization, experiment, blade manufacturing

**Scientific discipline:** Mechanical engineering

**Scientific sub-discipline:** Aerospace engineering

**UDC:** 621.548.5:533.69:[004.942:519.62/.63(043.3)

621.548.5:533.69.04]:004.942(043.3)

533.662:66.018.9]:620.162:004.932(043.3)

*Деда Бокију...*



# Садржај

<b>1</b>	<b>Увод.....</b>	<b>1</b>
1.1	Трендови развоја енергије ветра.....	1
1.2	Основне напомене о ветротурбинама.....	3
1.3	Композитни материјали у индустрији ветротурбина.....	6
1.4	Експериментална испитивања.....	8
1.5	Предмет истраживања и организација дисертације.....	11
<b>2</b>	<b>Преглед литературе.....</b>	<b>15</b>
2.1	Уводне напомене.....	15
2.2	Анализа опструјавања и модела за аеродинамички прорачун ветротурбина са вертикалном осом обртања.....	16
2.3	Прорачун ламинатних композитних структура.....	19
2.4	Оптимизација вертикалних ветротурбина.....	20
2.5	Доступни експериментални подаци.....	22
<b>3</b>	<b>Нумерички прорачуни.....</b>	<b>24</b>
3.1	Избор геометријског модела.....	24
3.1.1	Опис геометријског модела.....	29
3.2	Аеродинамички CFD прорачун.....	30
3.2.1	Геометријски модел.....	32
3.2.2	Прорачунска мрежа.....	34
3.2.3	Прорачунска поставка.....	39
3.2.4	Анализа и приказ резултата.....	43
3.3	Прорачун структуре лопатице.....	60
3.3.1	Структурни модел и материјали лопатице.....	60
3.3.2	Коначноелементни модел и гранични услови.....	63
<b>4</b>	<b>Оптимизација структуре лопатице.....</b>	<b>69</b>
4.1	Оптимизација ројем честица.....	69
4.2	Алгоритам прорачуна и софтверска имплементација.....	72
4.3	Изведене оптимизације.....	76
4.3.1	Двокритеријумска оптимизација.....	77
4.3.2	Трокритеријумска оптимизација.....	82
4.4	Изабрани оптимум.....	85
<b>5</b>	<b>Израда и експериментално испитивање лопатице са анализом резултата.....</b>	<b>88</b>
5.1	Процес израде лопатице.....	88
5.1.1	Израда калупа лопатице – негатива.....	89
5.1.2	Израда композитне лопатице.....	93

5.2	Припрема и ток експеримента.....	93
5.2.1	Експериментална поставка.....	94
5.2.2	Мерне траке.....	98
5.2.3	Систем за дигиталну корелацију слике (DIC).....	101
5.3	Анализа и дискусија резултата.....	106
5.3.1	Квантитативно поређење.....	106
5.3.2	Квалитативна анализа.....	112
<b>6</b>	<b>Закључак и препоруке за будући рад.....</b>	<b>117</b>
	<b>Литература.....</b>	<b>121</b>

## **Прилози**

## **Биографија**

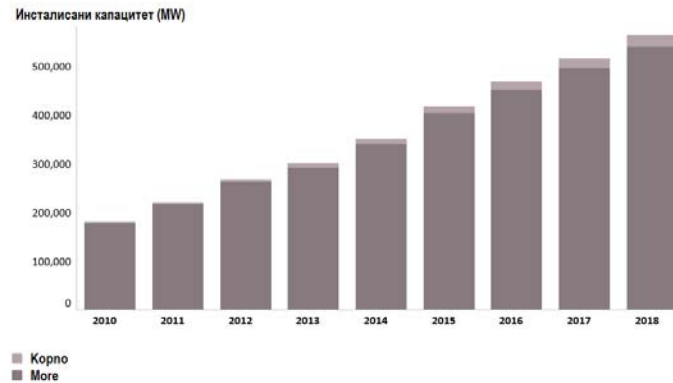
# Глава 1

## Увод

### 1.1 Трендови развоја енергије ветра

Повећање светске популације од скоро 4 пута током XX века има за последицу чак 30 пута већу потражњу за финалном енергијом. Према процени Међународне агенције за енергетику (IEA) у периоду од 2005. до 2025. године очекује се увећање потрошње примарне енергије за 40%. Узимајући у обзир необновљивост и ограниченост ресурса најкомерцијалнијих енергената данашњег света (нафте, угља и природног гаса) и пораст њихове цене, разумљива је, и оправдана, тенденција многих развијених држава за енергетском независношћу кроз улагање и развијање метода добијања електричне енергије из обновљивих извора, као што су енергија сунца, ветра, биомаса, геотермална. Са друге стране, знатно су повећани свест о штетности употребе фосилних горива за добијање електричне енергије и потреба за заштитом животне средине – воде, ваздуха, земљишта, али и људског здравља самим тим.

Употреба обновљиве енергије ветра је актуелна тема у области енергетике. Томе у прилог иде пораст укупне инсталисане снаге ветротурбина у свету која износи 600 GW, закључно са 2018. годином у којој је инсталисано нових 53.9 GW [1]. Иако то тренутно покрива 6% од укупне, светске, потребе за електричном енергијом, развитак и заступљеност ветротурбина је у сталном порасту на свим континентима, нарочито у земљама које представљају велико тржиште - Кини, Сједињеним Америчким Државама, Индији, Енглеској, Немачкој, Бразилу, итд. На слици 1. може се приметити значајан пораст инсталисаних капацитета ветроелектрана у свету у периоду од 2010. до 2018. године.



Слика 1. Раст инсталираних капацитета на светском нивоу [1]

Када је реч о Европској Унији, производња енергије из ветра тренутно покрива 14% укупне потрошње електричне енергије, што је за 2% више него у прошлој години. Такође, употреба енергије ветра за добијање електричне енергије (у смислу инсталираних капацитета) у Европској Унији у 2018. години надмашује све остале технологије које се користе (хидроелектране, соларне електране, нуклеалне и термоелектране), осим електрана на гас [2].

Разлог за све веће инвестиције у овај вид обновљивог извора енергије је и цена саме изградње ветроелектрана која опада из године у годину, јер, захваљујући огромном технолошком напретку, ветротурбине представљају поуздане машине чија снага и ефективно време рада непрекидно расту. Од 2010. до 2017. године цена енергије из ветра на глобалном нивоу је опала за око 20% и тренутно износи око 0.06 \$/kW (мисли се на инсталације на копну), великим делом и због огромне распрострањености ове технологије у Кини и Индији [1]. У Европи је, такође, прошла година била рекордна по улагању у енергију ветра. Планирано је чак 190 фарми ветротурбина у 22 државе, највећим делом у северној и западној Европи, док југоисточни део Европе, услед макроекономских и политичких фактора, представља само 4% од укупне инвестиције [2].

Србија је, како чланица Енергетске заједнице, прихватила обавезу да примени европске директиве у области обновљивих извора енергије, према којима је обавезан циљ од 27% обновљивих извора енергије у бруто финалној потрошњи енергије у 2020. години, а у тренутку приступања чланству Европске уније ће бити и у обавези смањења емисије гасова са ефектом стаклене баште. Тренутно, постојећи удео обновљивих извора енергије у бруто финалној потрошњи износи

20.1%. Укупни технички расположив потенцијал обновљивих извора енергије у Србији се процењује на 5,65 милиона тен (тона еквивалентне нафте) годишње, од којих 0,103 милиона тен представља потенцијал енергије ветра. Од 2010. године, када је у Србији почео да се примењује систем „фид-ин” тарифа, присутан је континуирани раст нових капацитета за производњу електричне енергије из обновљивих извора енергије [3]. Када говоримо о енергији ветра, инсталиране су 4 ветроелектране снаге 25 MW, а 5 ветроелектрана стекло је статус привремено повлашћеног произвођача укупне снаге 475 MW [4]. Током извештајног периода који се односи на 2016. и 2017. годину у Србији је на мрежу прикључено 17 MW нових ветроелектрана. Током 2019. године очекује се да се на електроенергетску мрежу прикључе још 4 ветроелектране укупне инсталисане снаге 370 MW, а током 2020. године још две ветроелектране од 102 MW и 66 MW, чиме ће се укупни електроенергетски потенцијал повећати за 8,98%, односно за 21,95% у смислу обновљивих извора енергије [5].

На основу ових података може се закључити да је у Србији остварен значајан напредак у коришћењу енергије ветра и да је усвојеним подстицајним мерама у Србији могуће изградити ветроелектрану на финансијски исплатив начин. Иако су све веће ветротурбине у Србији готово у целости увезене, као и највећи део пратеће опреме, последњих година примећено је и присуство домаћих компанија и средстава у овој области. Занимљиво је и да постоји све већи број индивидуалних система, мањег капацитета, за напајање мањих група потрошача у нпр. руралним срединама. С тога је од велике важности правити додатна улагања у истраживање и развој ветроенергетског система, остварити одговарајуће искуство и омогућити трансфер технологије у овој области, што је врло значајно за земље у којима је ова индустрија недовољно развијена.

## 1.2 Основне напомене о ветротурбинама

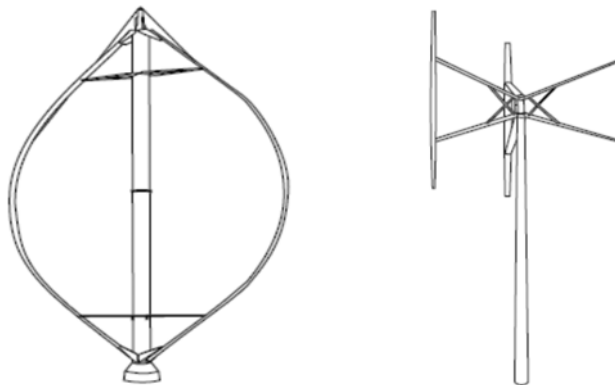
Ветрогенераторе, као машине које претварају кинетичку енергију ветра у електричну, представљају један комплексан систем за чије је успешно пројектовање и развој потребно обимно знање из више научних области као што су: аеродинамика, механика, аероакустика, електротехника, технологија

материјала, итд. У току прошлог века развијено је неколико различитих конструкција ветротурбина које се начелно могу поделити у две групе, према положају осе обртања, на ветротурбине са хоризонталном (ВХОО) и вертикалном осом обртања (ВВОО).

Први тип је заступљенији, ефикаснији, геометријски сложенији и начелно скупљи за производњу. Састоји се од следећих основних функционалних група: ротора који најчешће има 3 лопатице, гондоле, стуба, система преноса снаге (може и без) и електросистема, као и бројних пратећих система који обезбеђују сигуран рад ветротурбине. Овакве конструкције достижу снагу од 7 MW, самим тим омогућавају већу производњу електричне енергије и углавном се користе у склопу ветроелектрана, било на копну или мору, које су прикључене на јавну мрежу. Лопатице ротора представљају једну од најбитнијих компоненти система ветротурбине. Савремене лопатице мегаватних ветротурбина подразумевају комплексну геометрију и структуру која ће издржати велика и променљива оптерећења у дугом временском периоду.

Поред конвенционалних ветротурбина са хоризонталном осом обртања последњих деценија се све више ради на развоју и унапређењу ветротурбина са вертикалном осом обртања. Јасно је да оба типа имају своје области примене [6] али ВВОО представљају веома атрактиван производ за мање потрошаче, како у урбаним тако и у руралним срединама, за аутономне системе, погон хидрауличких пумпи, пуњење акумулатора, као део хибридног система, итд. Нарочито су ВВОО занимљиве истраживачима на факултетима и институтима, који се баве њиховом анализом, испитивањима и изградом у експерименталне сврхе, о чему ће бити реч у Прегледу литературе. Предности ових ветротурбина се огледају у једноставнијој и, донекле, стабилнијој конструкцији, могућности рада при малим и променљивим брзинама и правцима ветра (без система за закретање), нижој цени производње, лакшем одржавању јер се генератор налази ближе земљи, итд. Са друге стране, нижи степен ефикасности у односу на ВХОО, немогућност самопокретања и променљиво аеродинамичко оптерећење су неке од њихових главних мана. Детаљније о поређењу ветротурбина са хоризонталном и вертикалном осом може се наћи у [7].

Постоје два основна типа ВВОО: отпорни (Савонијус) и узгонски (Даријус). Узгонски тип ветротурбина је нашао много већу примену у пракси. Постоји неколико различитих конструкција узгонског типа, али посебно је интересантна и доста анализирана у литератури Даријусова ветротурбина (слика 2). Она се састоји, најчешће, из две или три аеропрофилсаних лопатица које ротирају око централног вратила и могу бити равне, закривљене или хеликоидне.



Слика 2. Даријусове ветротурбине са закривљеним (лево) и равним (десно) лопатицама

Код равних лопатица сваки сегмент је једнако удаљен од осе обртања. Уколико се занемари вертикална промена брзине у једном временском тренутку сви елементи лопатице функционишу при истом коефицијенту рада  $\lambda$ . С тога, при оптималном односу обртне компоненте брзине и брзине ветра сваки део лопатице генерисаће максимални коефицијент снаге. Са друге стране, крајеви закривљених лопатица су смештени ближе осе обртања па раде при нижем коефицијенту рада, из ког разлога генеришу мањи коефицијент снаге. Када се упореде укупни доприноси свих делова равне и закривљене лопатице исте дужине, друга ће генерисати мање снаге (при истим радним условима). Међутим, праве лопатице захтевају додатне везне елементе који праве паразитни отпор и смањују ефикасност ветротурбине. Такође, услед константног коефицијента рада по целој лопатици опсег радних режима се смањује јер се слом узгона догађа дуж целе лопатице (ово се односи на неповољне радне режиме). Перформансе правих лопатица се могу побољшати употребом закривљених аеропрофила и омогућавањем закретања лопатице, што са друге стране значајно повећава

сложеност и цену конструкције. Једно од могућих решења представљају хеликоидне лопатице, које данас реализују компаније као што је Quietrevolution [8].

### 1.3 Композитни материјали у индустрији ветротурбина

Лопатице ветротурбина представљају компоненте чије пројектовање, процес производње, као и функционалност у радним режимима подразумевају примену материјала који омогућавају висок степен ефикасности и издржљивости. Такви материјали - композити подразумевају спој два или више материјала различитих особина на макроскопском нивоу, и поседују побољшане карактеристике од особина саставних компоненти што је детаљно описано у књигама [9-12]. Правилним одабиром влакана и матрице, постиже се испуњење специфичних захтева које новонастали материјал поседује и могућност примене е на конструкцијама високих перформанси као што су лопатице ветротурбина. У складу са првенственом улогом влакана да преносе оптерећења и са добрим односом чврстоће и тежине, при изради структура од композита најширу примену налазе стаклена и угљенична влакна. Као везивна компонента, матрица штити влакна и контролише хемијске особине композита и најчешће је у употреби епоксидна смола.

Димензије и облик влакана, као и њихов распоред у везивној фази-матрици утичу на особине добијеног композита. При процесу пројектовања и производње композитне структуре, морају се размотрити услови и намена, односно каквим оптерећењима може бити изложена у току свог радног режима. Композити се разликују од класичних материјала по нехомогености и изотропношћу, односно карактеристике композитних материјала су различите у различитим правцима.

Код ветротурбина са вертикалном осом обртања и малих снага, које не захтевају велику издржљивост и отпорност током радног века, лопатице се израђују најчешће од композита стакло-епоксидног састава. Повољан однос квалитета и цене оваквих материјала испуњава одговарајуће услове који су потребни за правилан рад и функционалност конструкције.



У изради компоненти ветротурбина, користе се методе засноване на компјутерским технологијама. Поред класичних технологија које се примењују за израду металних делова ветротурбина, за производњу композитних компоненти неопходна је примена савремених метода. Технологија, поред погодне цене и високе продуктивности, мора да обезбеди и висок квалитет компоненти који је неопходно постићи код оваквих делова. Карактеристике ротора се разликују у зависности од позиције на којој ће бити постављен, односно геометрија и аеродинамички облик ротора и композитних лопатица се пре свега прилагођавају карактеристикама ветра на одређеној локацији. Ова чињеница знатно утиче на одабир технологије којом се ротор израђује. За производњу и технологију израде композитних лопатица су задужене специјализоване компаније. Рапидан пораст у унапређењу материјала постаје императив таквим компанијама у циљу осавремењавања технологија производње и методологија дизајна. Лопатице композитних ротора, се као примарне структуре, израђују од ламинарних композита. Ова врста композита се добијаја слагањем слојева. У изради лопатица најзаступљенији композитни материјали су: епоксидна или полиестерска матрица ојачана стакленим, угљеничним или араמידним влакнима. Постоје две основне расподеле упредених влакана у самом слоју. Слој може имати влакна оријентисана у истом правцу-унидирекциони слој (ламина) или могу бити постављена у два међусобно нормална правца, односно да су међусобно испреплетана тј. да граде ткање. Армирајућа влакна могу бити различитих димензија и на различите начине су распоређени у слојевима. Платна, односно влакна, су комерцијално доступни исто као и смоле које после третирања постају матрице. Слојеви се групишу у калупу (слажу један преко другог) тако да граде ламине са истоветно оријентисаним влакнима. Свака ламина има свој основни правац који је оријентисан у складу са основним правцем влакана у ламини. Најчешће коришћени начини израде лопатица су: ручно полагање слојева у калуп (ламинирање), пултрузија и ткање за производњу рамењача.

При ламинирању (најзаступљенијем поступку израде), присутне су следеће фазе:

1. Припреме техничке документације на основу аеродинамичког дизајна
2. Израда калупа

### 3. Израда оплате лопатице унутар калупа

#### 4. Склапање лопатице

Слој смоле се наноси на калуп (калуп је претходно премазан гелкотом или другим отпуштајућим премазом због постизања глатке површине). Први слој ојачавајућих влакана се тада полаже у влажну смолу. Затим се процес понавља док се не достигне жељена дебљина оплате. Приликом полагања влакана неопходно је обрадити слојеве коришћењем ваљака да би се осигурало потпуно квашење носећих влакана и постигла компактност ламината, односно заробљени ваздух ослободио. Прекомерна смола се одстрањује еластичном стругалицом. Уколико се користе стаклена влакна промена боје указује да је постигнута задовољавајућа оквашеност док код графитних влакана не долази до промене боје влакна. Технологија производње ламинарних композита обухвата производњу у отвореним или затвореним калупима али је могуће направити композитну структуру и без калуца. У зависности од тога да ли су комерцијално набављена препрег платна или платна без смоле, поступак производње је 'суви' или 'мокри', када се смола (матрица) наноси по слојевима. По постављању слојева у калуп приступа се третирању које се може вршити при атмосферским условима притиска и температуре или се може вршити у аутоклавима при повећаној температури и прописаном повећаном притиску за третирање. Процес израде композитне лопатице започиње формирањем калуца. Након израђеног костура, приступа се полагању композитних слојева. На готове калуце наносе се спољашњи и унутрашњи слојеви влакана оплате а затим убризгава смола под вакумом. Позиционирањем одговарајућих елемената, калуп је припремљен за затварање кад започиње очвршћавање убризгане смоле и постављених влакана. Након завршетка овог процеса, формирана лопатица се вади из калуца, а затим облаже додатним ојачавајућим слојевима и припрема за свој завршни, коначни облик.

## 1.4 Експериментална испитивања

Лопатице ротора модерних ветротурбина су изложене дејству статичких и динамичких оптерећења, па је потребно развити методологију поступка њиховог

испитивања. Комплексна оптерећења лопатица ротора укључују велика инерцијална (центрифугална) оптерећења, циклична и наизменична аеродинамичка оптерећења као и абразивне и корозивне деградације која лопатица мора да издржи у току свог експлоатационог периода.

Опрема за испитивање статичких и динамичких особина конструкција у лабораторијским условима је специфична и прилагођена конкретној примени. Постојеће инсталације за испитивање композитних лопатица ротора заснивају се на конструкцијама чији је развој условљен потребама истраживања у оквиру научних институција или испитивањем конструкција лопатица у различитим фазама пројектовања, производње и испитивања квалитета од стране пројектаната и произвођача. Постоји низ специјализованих инсталација за сертификацију делова према важећим стандардима. Постојећи системи се заснивају на хидрауличким актуаторима, дизалицама или електромоторима који симулирају оптерећења којима испитивана конструкција изложена у току радног века. Постоје инсталације је специјализоване за статичка, односно динамичка испитивања, али и комбинована испитивања. Све испитне инсталације су пројектоване имајући на уму посебну намену, узимајући у обзир распон димензија испитиваних конструкција и спектре и амплитуде радних оптерећења.

Експериментална испитивања обухватају примену одговарајуће лабораторијске инсталације и мерне опреме којом се мере померања, деформације, напони. Приликом експерименталног мерења највећи проблем у пракси је недовољна прецизност просторног поља померања и деформација на локацијама дисконтинуитета испитиваног узорка.

Најчешће примењене екстензометријске методе представљају мерне траке и механички екстензометри. Техника мерних трака се примењује у одређивању локалних деформација на реалним структурама и моделима. Мерне траке представљају отпорне претвараче који своје подужно истезање претварају у промену отпорности. Најчешће се израђују у виду вишеструко савијене танке жице унутар специјалне фолије – носача траке, која се може залепити специјалним лепком на место где се жели измерити деформација. Осим жичаних мерних трака користе се и траке у облику фолија, розета или мембрана. Као материјали за израду трака користе се метали и полупроводници (легури са врло

малим температурним коефицијентом отпорности). Полупроводничке мерне траке су око стотину пута осетљивије од металних, погодније су код динамичких и краткотрајних статичких испитивања, али су зато знатно осетљивије на утицај температуре при чему се типична отпорност креће између  $100\Omega$  и  $300\Omega$ . Мерне траке одређују вредности истезања еластичне подлоге у правцу дуж кога је трака залепљена. Еластичне деформације се описују Хуковим законом, а релативна промена отпорности траке је сразмерна релативном истезању  $\Delta R/R = k \cdot \varepsilon$ , где  $k$  представља коефицијент осетљивости траке. Овако мале промене отпорности се мере помоћу Витсоновог моста где се траке стављају у гране Витсоновог моста и служе као претварачи. Пошто су деформације које се мере релативно мале (реда  $10^{-4}$ ) то су релативне промене отпорности мерних трака мале. Због тога утицај температуре значајно утиче на промену отпорности мерне траке. Између моста и трака мора се остварити температурна стабилизација (обично се остварује применом две траке спојене у две суседне гране моста или мост са четири траке спојене у све четири гране). Траке би требало да буду залепљене близу једна другој у циљу постизања једнакости температура и бити упарене (исти произвођач). Промене отпорности услед деловања силе морају бити супротног знака, утицај промена отпорности на напон се сабира, односно повећава се осетљивост мерења.

Мерне траке дају велику прецизност мерења деформација, мерење се може вршити у више тачака у широком температурном опсегу и различитим климатским условима, могу се мерити више компонентне деформације. Међутим, мерне траке могу одредити само деформације на површини тела и само деформације у тачки, што не даје комплетно напонско стање у телу. Такође, услед малих промена отпорности низак је и ниво излазног сигнала Витсоновог моста. Механички екстензометри се примењују за мерење локалне деформације механичким путем, али су такође ограничени на одређивање локалних параметара.

У циљу унапређења нумеричких модела и прецизности анализе структуралних карактеристика, потребно је извршити експериментална мерења применом метода које омогућавају мерење поља померања и на локацијама израженијих геометријских дисконтинуитета. Из наведених поступака

експерименталног испитивања, може се извести закључак о отежаним условима и могућности примене, пре свега, постојању адекватне опреме и мерних инсталација, дужег временског периода тестирања и задовољавајуће прецизности добијених података. Из тог разлога, све више су у употреби неконвенционални, неинванзивни методи експерименталног испитивања – као што је нпр. оптички мерни систем за дигиталну корелацију слике. Применом савремених експерименталних метода на верификацију нумеричких модела, постиже се настанак модела који верно представљају понашање структуре под дејством оптерећења у реалним условима. Применом дигиталне фотографије и савремене софтверске технологије, анализара се комплетно поље тачака, што омогућава брзу обраду података. DIC системи примењују серију дигиталних слика за приказивање површинске деформације и напрезања структуре. Одговарајући патерни у виду стохастичких шара се наноси на испитивани узорак што омогућава прецизно издефинисане пикселе на фотографијама са камера. Поступак просторног поља померања обезбеђује прикупљање великог броја података, као и праћење директних поређења померања и деформација. DIC систем обухвата сет стерео камера и сочива за сваки од софтвера, уређаја за контролу напајања и снимања слика као и рачунарски систем за аквизицију, обраду и приказ података. Камере DIC система су високе резолуције, чиме је омогућено кратко време одређивања деформација. Сам поступак подразумева припрему и постављање тестираног узорка, подешавање мерне инсталације DIC система и одговарајући софтверски пакет за прикупљање и обраду података. Извођење експеримента се снима у програмском пакету PHOTRON, а затим се добијени параметри увозе у софтвер ARAMIS за обраду и прорачун. Непосредно пре извођења самог експеримента, неопходно је извршити хардверску и софтверску калибрацију мерног система, што ће детаљно бити приказано у Поглављу 5.

## 1.5 Предмет истраживања и организација дисертације

Предмет истраживања је Даријусова ветротурбина са три равне лопатице (константни аеропрофил и тетива). Иако начелно једноставне конструкције, анализа ове ветротурбина укључује изузетно комплексну аеродинамичку слику

која подразумева веома нестационарно струјање при релативно малим Рејнолдсовим бројевима, турбуленцију, одвајање граничног слоја, стварање вртлога, динамички слом узгона итд. Из тог разлога било је потребно спровести више аеродинамичких прорачуна различите сложености, при чему је у раду приказан један од најзахтевнијих и најтачнијих модела. Мотив је био добијање што реалније слике опструјавања ротора ветротурбине и вредности сила које делују на лопатицу. Даље истраживање се односило на побољшање структурног дизајна лопатице које би допринело смањењу њене масе, самим тим и трошкова производње, и крајње дужем оперативном веку, уз очување интегритета саме конструкције лопатице.

Већ је напоменуто да се композитни материјали, због својих добрих карактеристика, намећу као најбоље решење у производњи лопатица, нарочито када у питању ветротурбине мале снаге. Одговарајућим формирањем композита могу се остварити значајне уштеде у маси, а поштујући услове чврстоће и крутости лопатице. Са друге стране, аеродинамички облик лопатице (тетива, угао витоперења, аеропрофили, њихов избор и расподела дуж лопатице) директно утиче на ефикасност и перформансе ветротурбине. Већа аеродинамичка ефикасност некада захтева робуснију (самим тим и скупљу) конструкцију лопатице, па је овако супротстављене захтеве тешко задовољити. Трошкови израде лопатица износе око 20 процената од укупне цене ветротурбине, па велики значај представља и најмањи помак у постизању бољег решења приликом пројектовања структуре.

Савремене методе пројектовања ветротурбина подразумевају већу брзину и ефикасност фазе концептуалног дизајна, аутоматизацију процеса које је потребно поновити много пута, као и изведбе напреднијих и поузданијих нумеричких прорачуна уз коришћење одговарајућих метода оптимизације. Различити и често супротстављени захтеви стварају потребу за интеракцијом више научних дисциплина и вишекритеријумском оптимизацијом како би се дошло до најбољег могућег решења (или скупа решења). Све то је пожељно извршити у што краћем временском периоду, а развој рачунара и стални пораст њихових хардверских и софтверских могућности чини овакве инжењерске прорачуне бржим. Приликом дефинисања оптимизационог поступка велики број различитих величина може

бити изабран за улазне и излазне параметре и ограничења, па је правилно дефинисање функције циља веома битан задатак. Са аеродинамичке стране интересантни параметри могу бити: максимална снага или сила потиска и одговарајући коефицијенти, процењена годишња производња, минимална брзина потребна за покретање ветротурбине, оптимална брзина, оптимални коефицијент рада, максимална брзина ветра итд. Са аспекта структуре уобичајено је разматрати: масу лопатице, максимални напон или деформацију, критеријум лома, сопствене фреквенције итд. Огромна примена композитних материјала у овој грани индустрије захтева релативно нове, можда недовољно верификоване структуралне прорачуне. Ограничена доступност експерименталних резултата у области анализе композитних лопатица, као и карактеристике и понашање самих материјала, отежавају валидацију нумеричких поставки.

У оквиру рада испитане су могућности унапређења структурног дизајна композитне лопатице успостављеном методологијом прорачуна и вишекритеријумском оптимизацијом. Детаљном анализом добијеног скупа решења изабран је одговарајући модел лопатице који је и реализован. Експерименталним испитивањима израђене лопатице ламинатне композитне структуре добијени су резултати који валидирају претходну нумеричку поставку.

Дисертација је написана у седам поглавља. Прво поглавље представља уводни део који је подељен на неколико потпоглавља у којима су: приказани трендови развоја енергије ветра у свету и у Србији, тренутни инсталирани капацитети, потреба и оправданост континуираног истраживања у области технологије ветротурбина, затим дефинисани основни типови конструкције ветротурбина, наведене неке од њихових предности и мана, и основни принцип рада. Даље, дат је кратак преглед поступака експерименталног испитивања и технологије израде композитних лопатица, и на крају је дефинисан предмет истраживања у овом раду.

У другом поглављу – Преглед литературе – истакнуте су најзначајније референце које су подељене у 5 целина: уводне напомене, анализа опструјавања и модела за аеродинамички прорачун ветротурбина са вертикалном осом обртања, прорачун ламинираних композитних структура, оптимизација вертикалних ветротурбина и доступни експериментални подаци.

У трећем поглављу детаљно је описан поступак анализе ветротурбине са вертикалном осом обртања мале снаге. Приказана је 3Д анализа опструјавања ротора ветротурбине методом коначних запремина и спроведени аеродинамички порачуни различите сложености. Затим је дат приказ карактеристика изабраних композитних материјала и прорачун структуре ламинатне композитне лопатице применом методе коначних елемената.

Четврто поглавље приказује поступак оптимизације композитне структуре лопатице ветротурбине. Резултати спроведеног аеродинамичког прорачуна опструјавања фиксираног спољашњег облика лопатице (пре свега аеродинамичких сила које делују на лопатицу) и развијени параметризовани, структурни модел лопатице и метод прорачуна, искоришћени су у наставку за оптимизацију дефинисаних параметара структуре лопатице (броја  $n_i$  и оријентације  $\theta_i$  слојева ламинатне структуре композитне лопатице). Као метод оптимизације изабрана је оптимизација ројем честица. За спровођење целог поступка развијен је сопствени код који је детаљно описан у овој глави.

У петом поглављу описани су поступак израде композитне лопатице и експерименталног испитивања. Приказана је израда калупа од медијапана на нумерички управљаној машини и процес формирања лопатице од композитног материјала. Дате су слике и подаци о поставци за експеримент и опреми која је коришћена за статичко испитивање композитне лопатице – конвенционалном методом мерних трака и неконвенционалном – методом корелације слика (Digital Image Correlation method). Упоређени су резултати деформација нумеричких прорачуна и експерименталног испитивања и изведени су закључци.

У шестом поглављу обједињени су научни и стручни доприноси и презентовани закључци у вези са предметом дисертације. Извршена је верификација поставки за нумеричке прорачуне на основу постигнутих експерименталних резултата и дате су препоруке за будући рад у овој области.



## Глава 2

### Преглед литературе

#### 2.1 Уводне напомене

Имајући у виду да представљена дисертација обухвата неколико различитих области/проблема, у току израде прегледан је опсежан број литературе у коју спадају научни, стручни и истраживачки радови, књиге, докторске и магистарске дисертације, монографије, разни технички извештаји, патенти, као и упутства и смернице о раду у програмским пакетима и језицима који су коришћени. Треба истаћи и да је литература на српском језику била од изузетне помоћи, али да је њен број изузетно мали. Садржај овог поглавља има за циљ да упути на референце које су се показале најкориснијим, у свим областима у којима је било потребно употпунити знање како би овај рад добио своју коначну форму.

У уводном делу је било речи о значају све веће употребе обновљивих извора енергије, и да коришћење енергије ветра има велики тренд развоја и у свету и у Србији. Постоји велики број аутора који се бави истраживањем класичног типа ветротурбина, с тога и велики број произвођача на тржишту. Међутим, овај рад се бави концептом ветротурбине са вертикалном осом обртања, мале снаге, која представља интересантно решење за добијање електричне енергије у урбаним срединама. Постоји неколико различитих типова ових ветротурбина [13], али је у овом раду анализирана Даријусова ветротурбина са три равне аеропрофилисане лопатице које ротирају око централног вратила.

Концепт Даријусове ветротурбине патентиран је давне 1926. Године као конструкција са три закривљене лопатице [14], и од тада до почетка 21. Века није имала много успеха у комерцијалном смислу. У периоду између 70тих и 90тих

година већина реализованих ветротурбина била је пречника мањег од 35м и са закривљеним лопатицама. Један од најактивнијих института у испитивању овог типа ветротурбина, у то време, била је SANDIA лабораторија у Новом Мексику. Њихов рад обухвата испитивање неколико различитих реализованих ротора – ротор пречника 2 m за потребе испитивања у аеротунелу, где је примећен велики утицај Рејнолдсовог броја на вредност снаге [15-16], ротор пречника 5m [17], ротор пречника 17 m у конфигурацијама са две и три лопатице [18-19], као и ротор пречника 34 m и снаге 500 kW који је представљао прекретницу у даљем развоју ветротурбина са вертикалном осом обртања [20].

После више од 20 година искуства у истраживању ветротурбина са вертикалном осом обртања било је могуће проценити потенцијал и сумирати проблеме у вези са даљим развојем овог типа ветротурбина у комерцијалне сврхе. Ове резултате је на користан начин сумирала група ауторау раду [21]. И последњих пар деценија употреба ветротурбина са вертикалном осом обртања је већином ограничена на пројекте тзв. урбане енергије ветра [22].

## 2.2 Анализа опструјавањаи модела за аеродинамички прорачун ветротурбина са вертикалном осом обртања

Основе прорачунске механике флуида детаљно су покривене класичном литературом [23-27]. Од књига и доктората на српском аутор значајни су [28-32]. Бројни су радови из области нумеричких симулација ветротурбина са вертикалном осом обртања. Детаљан и сликовит преглед постојећих конструкција и прорачунских модела може се наћи у [33], где се потенцира значај и распрострањеност једноставнијих модела као што су двоструки вишеструјни [Парашивоју, 34-37], потенцијални и каскадни модели. Аутори Рађити Кастели et al. [38] који у свом раду комбинују различите приступе такође дају лепу хронологију развита различитих прорачунских модела: „Употреба комбинованог (BE-M) модела (комбинације квази 1Д модела заснованог на законима одржања и теорије елемента лопатице) у пројектовању и анализи ветротурбина са вертикалном осом обртања веома је распрострањена, не само у академској и истраживачкој заједници, већ и у индустрији, превасходно због задовољавајуће

тачности излазних резултата као и једноставности прорачуна. Овакав приступ први пут је формулисао Глауерт [39] да би предвидео перформансе и понашање структуре пропелера летелица, а врло брзо је почела његова примена и на лопатицама хеликоптера и ветротурбина са хоризонталном осом обртања. Нешто касније, Темплин [40] је прилагодио комбиновану теорију тако да буде применљива и на ветротурбине са вертикалном осом обртања и тако формирао једнострујни модел који претпоставља да се све промене струјног поља дешавају у једној струјној цеви која обухвата цео ротор ветротурбине као и да је успорење брзине ветра константно по ротору. Потом је Стрикленд [41] проширио Темплинов иницијални модел тако што је почетну јединствену струјну цев поделио у више мањих (аеродинамички независних) струјних цеви и посматрао успорење брзине ветра по свакој од њих. На тај начин било је могуће урачунати локалне промене величина по ротору. Овај приступ, назван вишеструјни модел, даље је развијан од стране многих аутора [34-37, 42-45], нарочито током 80-их година XX века. Једна могућност је даља подела сваке струјне цеви на две половине, узструјну и низструјну, и појединачно посматрање промена брзине ветра по две половине ротора [34-37, 43]. Кроз стална побољшања и унапређења [46, 47] (укључујући различите оптимизационе технике као што је генетски алгоритам [48]), комбиновани модел се данас може сматрати довољно поузданим алатом за дизајн и процену перформанси Даријусових ветротурбина. Представља полазиште/основу многих прорачунских алата који се активно користе у индустрији ветротурбина [QBlade, 49].

Један од првих покушаја побољшања ефикасности ветротурбина са вертикалном осом обртања применом метода прорачунске механике флуида (CFD) начинио је Васберг et al. [50] који је посматрао обртање лопатице око вертикалне осе у униформном брзинском пољу. Такође, Симао Фереира et al. [51, 52] су у својим радовима представили систематску CFD раванску (2Д) анализу ротора са правим лопатицама. Изучаван је ефекат динамичког слома узгона на лопатици ветротурбине, и кроз поређење нумерике и експеримента изведеног PIV (Particle Image Velocimetry) техником нађено је да значајан утицај на облик вртложних структура које се формирају око и иза лопатице има и избор турбулентног модела.

Интересантне експерименталне и нумеричке студије динамичког слома узгона могу се наћи и у [52-59].

Несвакидашњи пример дизајна ветротурбине са вертикалном осом обртања за површину Марса може се наћи у [60]. Наиме, аутори Кумар *etal.* [60] су предложили процедуру дизајна и оптимизације ветротурбине са вертикалном осом обртања која ради при малим Рејнолдсовим бројевима засновану на заједничкој употреби и ВЕ-М и CFD метода. Интересантно је да су параметри те ветротурбине слични коначно усвојеним у овој студији. Са друге стране, аутори Рађити Кастели и Бенини [61] су изложили модел за процену снаге (енергетских перформанси) и аеродинамичких сила које делују на хеликоидну лопатицу у зависности од угла закретања лопатице. Анализа разматра пет различитих конструкција које се разликују по закривљености хеликоиде, док је виткост ротора константна и износи  $L/(2R) = 1.5$ .

Д'Алесандро *etal.* [62] су развили нови прорачунски приступ за симулацију отпорних ветротурбина са вертикалном осом обртања, заснован на CFD-у и аеротунелским мерењима, да би добили бољи увид у комплексно струјно поље које се формира око Савонијусовог ротора. Рађити Кастели *etal.* [63] су извршили нумеричку валидациону студију Даријусових микро-ветротурбина кроз систематско поређење са резултатима аеротунелских мерења. Овај рад је показао да је подешавањем параметара прорачунске мреже (вредности бездимензионалне удаљености од зида) статистичким методама могуће повећати тачност нумеричких прорачуна, уз истовремено задржавање релативне једноставности нумеричке поставке.“

Додатни примери нумеричких анализа ветротурбина са вертикалном осом обртања могу се наћи у [64-74]. Амет *etal.* [64] су спровели раванске анализе ротора при ниској и високој вредности коефицијента рада јер оне одговарају нарочито незгодним/сложеним струјним режимима. Ли *etal.* [65] врше поређење 2Д и 2.5Д прорачунских приступа, као и турбулентних модела различите сложености (URANS и LES). Росети *etal.* [66] такође врше поређење ВЕ-М и CFD метода над Н-ротором. Сун *etal.* [67] спроведе нестационарне симулације Даријусове ветротурбине помоћу сопственог CFD кода. Нарочит акценат стављају на анализу интеракцију између лопатица и одвојених вртлога (вртложног трага) у

зависности од коефицијента испуне ротора и коефицијента рада. Бруска *et al.* [68] истражују како виткост лопатице (па и Рејнолдсов број при коме раде) утиче на глобалне перформансе ветротурбине. Орланди *et al.* [69] спроводе просторне (3Д) анализе Н-ротора за које тврде да пружају резултате веће тачности од 2Д анализа. Лам *et al.* [70] се такође примарно баве изгледом и последицама вртложног трага помоћу 2Д и 3Д симулација. Нумеричке резултате валидирају PIV визуелизацијама струјног поља. Нарочите смернице за формирање прорачунског домена (потребних димензија и финоћа прорачунских мрежа) дате су у [71]. Пример прорачунски веома захтевних симулација Даријусове ветротурбине (при веома уситњеним просторним и временским прираштајима) изведене на супер-рачунару може се наћи у [72]. Овако високе прорачунске резолуције омогућавају детаљну анализу губитака на крајевима лопатица, динамичког слома узгона, развитка вртложног трага, интеракције лопатица и вртлога и сл. Још један пример напредније студије дат је у [73] где су аутори разматрали еластичне лопатице и бавили се интеракцијом флуида и структуре. Услед великог броја постојећих радова и приступа, Батисти *et al.* [74] 2018. године праве преглед најзначајнијих радова из области ветротурбина са вертикалном осом обртања у последњих 15 година.

### 2.3 Прорачун ламинатних композитних структура

У овом раду разматрана је композитна лопатица симетричне ламинатне структуре, а изабрани материјали сматрани су ортотропним. Математичко моделовање композитних плоча и љуски подразумева да се неким од развијених модела (Теорије еквивалентног слоја, Теорија слојева и Општа 3Д теорија еластичности) општи 3Д проблем еласто-механике сведе на 2Д случај, усвајањем одређених претпоставки. На овај начин анализа је умногоме упрошћена, а резултати који се добијају валидни. За анализу танких плоча и љуски користе се теорије еквивалентног слоја различитог реда – Класична ламинатна теорија, Теорија смицања првог реда и Теорија смицања трећег реда. Карактеристике површинских носача од композита описао је Реди у монографији [75].

За прорачун структуре композита користи се метод коначних елемената (МКЕ), што је детаљно објашњено у [76-77].Изогеометријски метод примењен за анализу статичког и динамичког понашања композитних ламината, као и за анализу бифуркационе стабилности описано је у докторату [78].МКЕ је метод нумеричке анализе базиран је на употреби рачунара и данас постоји велики број софтверских пакета у којима је имплементиран метод коначних елемената за решавање парцијалних диференцијалних једначина. Велики број аутора се служи комерцијално доступним софтвером ANSYS, који је и у овом раду коришћен. Барберо је у својој књизи дао детаљну анализу композита као материјала и анализу структура од композита применом МКЕ у овом програму [79]. Изузетно корисне информације могу се наћи и у упутству самог програма [81-86].

Анализом композитних лопатица ветротурбина са аспекта структуре бави се велики број аутора. Кокс [87] у свом раду разматра лопатицу ветротурбине са хоризонталном осом дужине 70 m направљену од комбинације стаклених и карбонских влакана. Извршен је прорачун структуре МКЕ методом како би се демонстрирао одзив приликом екстремних услова и дат је детаљан опис структурног дизајна лопатице. Сличном тематиком бавили су се и аутори у радовима [88-95]. Прелиминарни структурни дизајн композитних лопатица разматрали су и истраживачи једне од водећих лабораторија за обновљиве изворе енергије NREL. Бир и Миглиоре у свом извештају описују развијен код којим се потпуно дефинише структура композитне лопатице[96]. Структурни дизајн не подразумева само максималну чврстоћу лопатице већ и одабир композитног материјала који ће задовољити захтеве у погледу цене и масе лопатице [97-98]. У радовима [99-100] аутори анализирају могућност примене композита ојачаним природним влакнима на лопатице ветротурбина мале снаге.

## 2.4 Оптимизација вертикалних ветротурбина

Као и у области нумеричких симулација, примери истраживања оптималних ветротурбина са вертикалном осом обртања су заиста бројни и разноврсни па су у наставку издвојени само неки карактеристични радови новијег датума. И ту је могуће направити одређене класификације, у односу на тип

ветротурбине и параметре који су оптимизовани (са аспекта аеродинамике и/или структуре) или у односу на коришћени метод оптимизације.

Тако рад [101] приказује могуће повећање ефикасности Савонијусовог ротора увођењем уводника чија је оптимална геометрија добијена након поновљених извођења раванских CFD анализа. Маринић-Крагић *et al.* [102] спроводе FSI анализу и оптимизују еластичне лопатице Савонијусовог ротора помоћу генетског алгоритма. Хе *et al.* [103] такође оптимизују модификовани S-облик лопатице Савонијусовог ротора генетским алгоритмом и пријављују могуће повећање снаге од 34%. Још неки примери сличних истраживања могу се наћи у [104, 105].

Утицај коефицијента испуне и броја лопатица на оптимални дизајн Даријусовог ротора обрађен је у [106]. Истраживање описано у [107] разматра утицаје геометријских параметара ветротурбине на њену глобалну ефикасност, такође помоћу CFD приступа. Међутим, како нема једнозначних смерница за оптималне вредности геометријских параметара вертикалних ветротурбина, студија приказана у [108] систематски разматра 70 различитих конструкција користећи једноставније прорачунске моделе. Оптимизација аеропрофила лопатице употребом двоструког-вишеструјног прорачунског модела и генетског алгоритма приказана је у [109]. Пример једнокритеријумске оптимизације аеропрофила за ветротурбине са вертикалном осом обртања, а уз помоћ CFD приступа и генетског алгоритма, може се наћи у [110], а вишекритеријумске у [111]. Побољшање аеродинамичких перформанси ветротурбине проналаском оптималних углова закретања лопатице изучавано је у [112, 113]. Додатни примери оптимизације аеропрофила и ротора ветротурбине (чисто са аспекта аеродинамике) могу се наћи у [114-120].

Структурална оптимизација композитне лопатице ветротурбине помоћу генетског алгоритма описана је у [121]. У питању је ограничена једнокритеријумска оптимизација чији је циљ био минимизација масе лопатице. Утицај оријентације карбонских влакана на чврстоћу лопатица ветротурбина са хоризонталном осом обртања разматран је у [122]. Преглед начињених оптимизационих студија композитних структура (ламината, сендвич-панела) дат је у [123]. Методологија за смањење масе композитних лопатица базирана на

генетском алгоритму и вештачким неуронским мрежама приказана је у [124]. Даљи рад исте групе аутора [125] настављен је у правцу оптимизације ређања ламината композитне лопатице ветротурбине са хоризонталном осом обртања. Слична истраживања, спроведена помоћу методе коначних елемената и генетског алгоритма, могу се наћи у [126-129]. Рад на спрегнутој аеродинамичко-структуралној оптимизацији лопатице ветротурбина са хоризонталном осом обртања описан је у [130]. Коришћене прорачунске методе су ВЕ-М и МКЕ, а метод оптимизације генетски алгоритам. Пример развоја платформе за спрегнуту аеродинамичко-структуралну оптимизацију ветротурбина са вертикалном осом обртања у MATLAB окружењу дат је у [131]. Други пример вишекритеријумске интегралне оптимизације лопатице ветротурбине са хоризонталном осом обртања помоћу софтверског пакета ANSYS представљен је у [132].

Приметно је да је у изведеним студијама најчешће коришћени метод оптимизације генетски алгоритам. Како је у овој студији ипак примењена оптимизација ројем честица, услед своје брзине конвергенције и једноставности имплементације, као најкорисније показале су се референце [133-138].

## 2.5 Доступни експериментални подаци

Геометријске карактеристике лопатице значајно утичу на аеродинамичке перформансе ротора ветротурбине. Аеропрофили спадају у једне од најважнијих геометријских карактеристика, и њихов адекватан избор је веома важан. Испитивањем аеропрофила за примену на ветротурбине мање снаге бавили су се аутори у радовима [139-141]. Резултати експерименталних испитивања, како аеродинамичких (опструјавање у аеротунелу, мерење аеродинамичких сила) тако и структурних (композитни материјали, статичко и динамичко испитивање, замор) били су од користи приликом дефинисања прорачунских модела и самог експерименталног дела овог рада. У том смислу треба издвојити радове који се баве тестирањем ветротурбина са вертикалном осом обртања [142-148]. Посебно је интересантан рад аутора Поурацабиана који се бави аеро-структурном оптимизацијом и дизајном композитне лопатице мале ветротурбине [149]. Књиге [150-151] баве се применом метода коначних елемената за анализу и прорачун



ламинираних композитних конструкција. Разматран је и одређен број радова са објављеним резултатима из области изогеометријске анализе као савременог и неконвенционалног поступка прорачуна композитних ламината [152-156]. У радовима [157,158] је представљена анализа лопатице ветротурбине са вертикалном осом обртања, где је лопатица структурално оптимизована, а затим статички и динамички (вибрације) тестирана. Такође, кроз радове [159-162] разматрани су експериментални поступци испитивања аеродинамичких параметара у циљу оптимизације дизајна лопатица малих ветротурбина. Мерни поступак примењен у експерименталном испитивању - метод мерних трака је детаљно описан у докторском раду [163]. Истраживање и тестирање динамичких карактеристика-заморног века структуралних елемената и вибрационох карактеристика паметних композитних структура, коришћењем мерних трака је анализирано у докторским дисертацијама [162, 163]. Неконвенционални експериментални поступак, који је примењен у статичком испитивању је метода корелације дигиталних слика (Digital Image Correlation – DIC). У докторским дисертацијама [164-165] приказана је примена овог поступка у статичком и динамичком испитивању, где су истраживања била усмерена ка значају и широкој употреби DIC система. Монографија [166] приказује опис неконвенционалних метода мерења и одговарајућу процедуру. Основу за почетак и припрему самог испитивања су представљала упутства предложена од произвођача мерне опреме и одговарајућих софтвера [167-168]. Одређивање и анализа статичких и динамичких параметара (статичко увођење оптерећења, вибрационе карактеристике поступком модалне анализе) композитних структура DIC поступком су истраживани у радовима [169, 172].

## Глава 3

# Нумерички прорачуни

У овој глави детаљно су описане фазе аеродинамичког и структурног прорачуна ротора мале ветротурбине са вертикалном осом обртања.

Дат је опис конструкције ветротурбине и описани су проблеми приликом избора геометријског модела ротора који је усвојен у складу са стеченим знањем и искуством. Процена аеродинамичких перформанси извршена је нумеричким путем методом коначних запремина помоћу комерцијалног софтверског пакета ANSYS FLUENT. За потребе аеродинамичког прорачуна 3Д опструјавања коришћен је модела тзв. модел „клизајућих мрежа”. Дат је и детаљан приказ прорачунске мреже и саме прорачунске поставке (за затварање Навије-Стоксових једначина осредњених Рејнолдсовом статистиком коришћен је  $k-\omega$  SST турбулентни модел), а на крају су добијени резултати анализирани. Даље, прорачун структуре ламиниране композитне лопатице изведен је методом коначних елемената, у истом софтверском пакету (ANSYS Mechanical), а приказани су модел лопатице, уведене претпоставке и ограничења и карактеристике коришћених материјала.

### 3.1 Избор геометријског модела

Уколико се разматра задовољавајући ресурс ветра (довољног интензитета и сталног правца и смера брзине), геометријски облик лопатица доминантно утиче на аеродинамичке карактеристике ротора ветротурбине, а тиме и на енергетску ефикасност (и исплативост) целе ветротурбине као и на одабир и димензионисање њених структурних параметара. Основне геометријске карактеристике лопатице ветротурбине са вертикалном осом обртања су: пречник ротора  $D$ , тетива  $c$

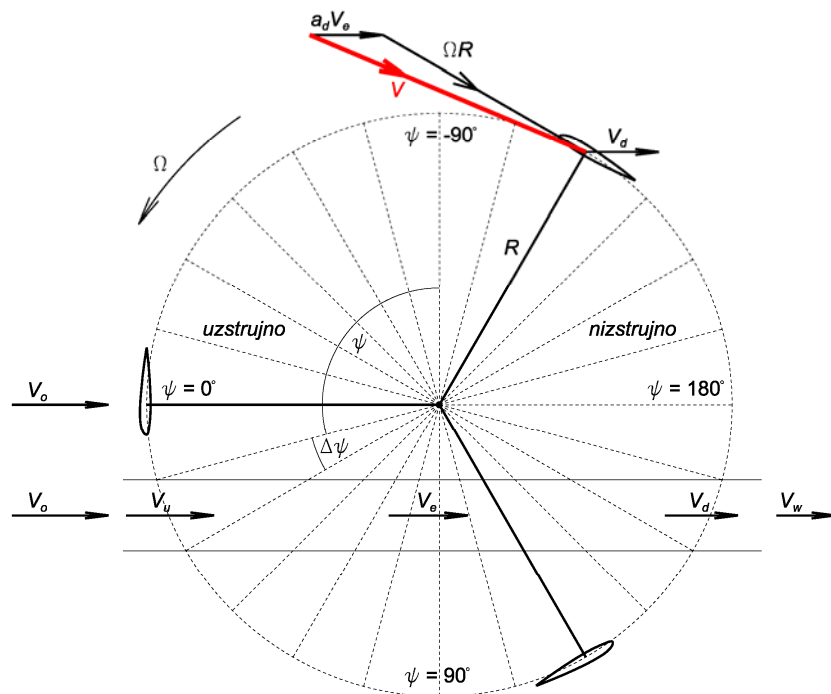
(односно коефицијент испуне ротора  $\sigma$ ) и аеропрофил које представља попречни пресек лопатице. Иако је одговарајућа комбинација ових параметара раније већински била утврђивана емпиријски, кроз многобројне пробе и понављања мерења одзива ветротурбине, данас се процес концептуалног дизајна (и пројектовања) ветротурбина углавном изводи уз помоћ рачунара и савремених програмских пакета за моделирање и прорачун. На овај начин, могуће је дефинисати побољшани (оптимизовани) производ, уз остваривање значајних уштеда и у времену и у потребном материјалном улагању.

Најпотпунији поступак за дефинисање мале ветротурбине са вертикалном осом обртања начелно подразумева интегралну (аеродинамичко-структуралну) оптимизацију свих најјутитајнијих параметара, како геометрије тако и структуре. Међутим, поред чињенице да је такав поступак прорачунски најскупљи, он такође захтева дубинско познавање физикалности проблема (опструјавања и понашања структуре), правилан одабир параметара који се оптимизују и софтверско повезивање неколико веома различитих програмских алата. Како то најчешће није једноставно, већина истраживача/аутора опредељује се за разматрање једне од ове две значајне области (аеродинамички или структурални прорачун) и увођење одређених упрошћења.

Тако се опструјавање ротора ветротурбине са вертикалном осом обртања најчешће разматра као раванско (2Д). Аеродинамички прорачун могуће је вршити неким од наведених категорија модела [33] поређаних од прорачунски најједноставнијих ка најсложенијим:

- квази 1Д моделима заснованим на законима одржања масе, количине кретања и енергије уз претпоставку стационарног струјања и идеалног флуида (одређеним корекцијама могуће је урачунати део вискозних ефеката),
- вртложним моделима који претпостављају потенцијално струјање, а опструјавана геометрија и вртложни траг се приказују низом везаних и слободних вртлога,
- моделима прорачунске механике флуида којима је могуће разматрати нестационарно, турбулентно струјање из ког разлога се данас све више примењују.

Квази 1Д прорачунски модели засновани на законима одржања су и даље најзаступљенији услед брзог пружања резултата задовољавајуће тачности, нарочито у аеродинамички „чистијим” радним режимима [32]. Услед своје једноставне имплементације изузетно су погодни за примену у оптимизационим поступцима. Како и овде постоји неколико поткатогија прорачунских модела заснованих на различитим претпоставкама, рад [138] базиран је на „двоструко вишеструјном” моделу [34] којим се промене струјног поља око ротора квантификују кроз промене (успорјење) брзине ветра у узводним и низводним деловима низа струјница, слика 3.1. Са друге стране, силе које делују на лопатицу могуће је проценити уколико су познате тренутна релативна брзина  $V$  и аеродинамички коефицијенти аеропрофила, узгона  $C_z$  и отпора  $C_x$ . Основне мане овог модела су претпоставка стационарности струјања (разматрање осредњених промена струјног поља), претпоставка да не постоји интеракција између лопатица и потпуна зависност од експериментално одређених раванских аеродинамичких карактеристика аеропрофила (које се свакако донекле разликују од просторних при ротационом кретању лопатице).



Слика 3.1. Приказ значајних величина (брзина) код „двоструко вишеструјном” прорачунског модела

Вртложни модели су у могућности да пруже задовољавајуће илустрације вртложног трага при мањим и средњим вредностима коефицијента рада, али не и при већим. Најчешће налазе примену при оптимизацији фарме ветротурбина где је од нарочитог значаја утицај једне ветротурбине на оне које су смештене иза ње. Међутим, услед већинског занемаривања ефеката вискозности флуида, овде нису детаљније разматрани.

Све већа распрострањеност модела прорачунске механике флуида може се објаснити најмањим бројем полазних претпоставки и упрошћења. Начелно, они су способни да разматрају нестационарно, вртложно, турбулентно струјно поље које се јавља око ротора. Међутим, опструјавање ветротурбина са вертикалном осом обртања је изразито сложено јер су присутни бројни нелинеарни ефекти и струјни феномени (асиметричност струјног поља, велики нападни углови, одвајање струјања и сл). За успешно спровођење прорачуна потребне су веома fine прорачунске мреже и ситан временски корак чиме се веома увећава комплексност и дужина трајања прорачуна. Из тог разлога, скоро уједначено се спроводе и раванске и просторне анализе опструјавања ротора. Такође, веома ретко се овај приступ комбинује са оптимизацијом (јер су потребни значајни прорачунски ресурси/супер-рачунари), већ се најчешће користи за проверу и детаљну анализу коначног дизајна.

Истраживање описано у [138] разматра различите стратегије спровођења интегралне (аеродинамичко-структуралне) вишекритеријумске оптимизације мале ветротурбине са вертикалном осом обртања. Описани процес реализован је повезивањем раванског „двоструко вишеструјног” модела (искоришћеног за процену аеродинамичких перформанси ветротурбине), коначно-елементног модела (којим је процењено померање ламинатне структуре лопатице) и оптимизационог поступка ројем честица посебно прилагођеног истовременом разматрању неколико циљних функција. Разматрани су следећи улазни параметри: пречник ротора  $D$ , дужина  $L$ , тетива  $c$  и аеропрофил лопатице, као и одговарајуће ређање ламинатне структуре лопатице. Неки од могућих излаза (циљних функција или ограничења) су: номинална снага  $P_{\text{nom}}$ , максимални коефицијент снаге  $C_{P,\text{max}}$ , минимална  $V_{\text{min}}$ , номинална  $V_{\text{nom}}$  или максимална  $V_{\text{max}}$  брзина ветра, оптимални коефицијент рада  $\lambda_{\text{opt}} = R\Omega_{\text{nom}}/V_{\text{nom}}$ , годишње

произведена енергија на локацији  $AEP$ , маса лопатице  $m$ , максимално померање структуре лопатице  $u_{\max}$ , критеријум лома  $I_F$ , сопствене фреквенције лопатице  $\nu_i$  итд. Неки од главних закључака спроведеног истраживања су:

- Како лопатица по својој кружној путањи пролази кроз широк опсег нападних углова, закривљеност аеропрофила (којом се врши блага транслација кривих коефицијента узгона и отпора по нападном углу) нема нарочит утицај на генерисану механичку снагу у радним режимима блиским номиналном. Увођењем закривљености попречног пресека лопатице могуће је мало побољшати перформансе при граничним радним режимима (блиским минималној и максималној вредности коефицијента рада  $\lambda$ ). Како ти посебни радни режими и стартне карактеристике ротора нису били основни предмет истраживања, оптимизација је вршена искључиво над симетричним аеропрофилима и то: NASA 0015, 0018, 0021, 0022, 0025. Генерално, аеропрофили мање релативне дебљине имају веће вредности градијента  $a$  и максималне вредности коефицијента узгона  $C_{z,\max}$  [30]. Са друге стране, дебљи аеропрофили олакшавају израду структуре лопатице јер остављају више простора за носеће елементе. Из свега наведеног, као оптимално намеће се средње решење – аеропрофил NASA 0018.
- Ниже вредности коефицијента испуне ротора  $\sigma = N_b c/D$ , које је за одређени број лопатица  $N_b$  могуће остварити кратким тетивама  $c$ , великим пречницима  $D$  или њиховом комбинацијом, подразумевају мању интеракцију између лопатица. У том (аеродинамички повољном) случају, лопатица већински не ради у успореном вртложном трагу претходне, већ у чистој струји ваздуха, чиме се повећава могућност искоришћења кинетичке енергије ветра. Даље, применљивост/валидност резултата „двоструко вишеструјног” прорачунског модела већа је у случају ротора мањег коефицијента испуне, па се генерално и препоручује дефинисање такве конструкције. Са друге стране, њихове мане су „празњикавост”,

некомпактност и велика виткост елемената структуре, па се најчешће усваја нека средња вредност.

- Генерално, веће вредности пречника ротора  $D$  и дужине лопатица  $L$  подразумевају већу радну површину  $A = DL$  ветротурбине са вертикалном осом обртања, а тиме и већу генерисану снагу  $P = 0.5\rho V_0^3 A C_P$  при различитим брзинама ветра  $V_0$ .

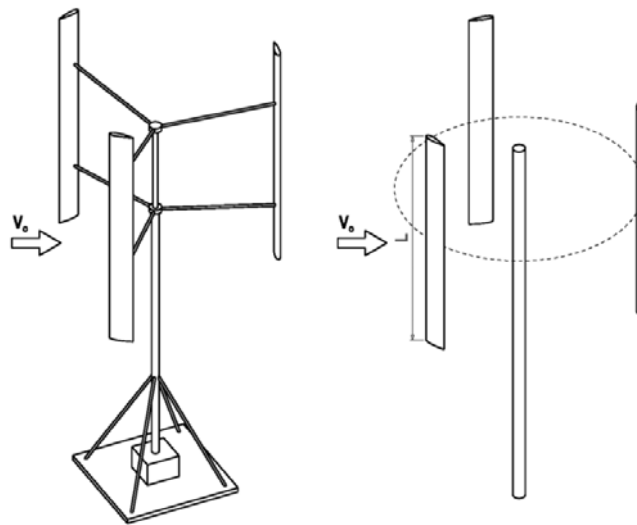
Наведене напомене воде ка глобалном закључку да, иако је могуће спровести аеродинамичку оптимизацију геометријских параметара ветротурбине са вертикалном осом обртања, коначно усвојене вредности неће бити независна функција само аеродинамике ротора, већ и бројних додатних утицаја и ограничења као што су елементи структуре, технологија производње, расположиви простор, цена, потребни материјал итд. Односно, када је потребно начинити коначни одабир геометријских карактеристика ротора, већина произвођача ће се ипак одредити за нека релативно стандардна и проверена решења која реализују компаније као што су нпр. МАКЕМУ и РОРАТЕС. Из тог разлога, дефинисана је полазна геометрија ротора (у складу са стеченим знањем и искуством), која је потом детаљно разматрана моделом прорачунске механике флуида и оптимизована са аспекта структуре што је и приказано у наставку главе.

### 3.1.1 Опис геометријског модела

Мала ветротурбина са вертикалном осом обртања димензионисана је тако да ју је могуће тестирати у постојећим факултетским лабораторијама, лако израдити и уклопити са доступним генератором (снаге  $P = 600$  W). Састоји се из  $N_b = 3$  праве лопатице дужине  $L = 1$  m константног аеропрофила НАСА 0018 које се по средини/на својим крајевима/по два попречна пресека спајају са централним обртним вратилом. Њени основни геометријски параметри су:

- полупречник  $R = 1.5$  m,
- пречник  $D = 2R = 3.0$  m,
- дужина  $L = 1$  m,

- референтна површина  $A = 2RL = 3 \text{ m}^2$ ,
- тетива  $c = 0.15 \text{ m}$ ,
- коефицијент испуне  $\sigma = N_b c/D = 0.15$ ,
- угаона брзина обртања ротора  $\Omega = 200 \text{ obrt/min}$ .



Слика 3.2. Упростићени модел разматране ветротурбине

### 3.2 Аеродинамички прорачун (CFD)

Процена аеродинамичких перформанси мале ветротурбине са вертикалном осом обртања извршена је нумеричким путем методом коначних запремина помоћу комерцијалног софтверског пакета ANSYS FLUENT [173-176]. Овај метод захтева поделу прорачунског домена на коначан број контролних запреминица по којима се решавају основне једначине одржања (транспорта) масе и количине кретања у интегралном облику [27]. Односно, прецизније је рећи да се вредности својстава флуида и величина струјног поља (густине, притиска, брзине и сл) суштински израчунавају у чвору (тежишту, средишту) сваке запреминице. Вредности величина поља по границама ћелије (потребне за прорачун флукса тј. површинских интеграла који се јављају у једначинама) рачунају се интерполацијом вредности у средиштима суседних ћелија које делу ту заједничку страну. Апроксимацијом површинских и запреминских интеграла, као и



просторних извода који се јављају у основним једначинама које описују понашање флуида, врши се њихова дискретизација и претварање у систем алгебарских једначина. Величина резултујућег система једначина једнака је производу броја ћелија и броја непознатих величина по ћелији. У том смислу, прорачун је захтевнији за ситније мреже и моделе струјања који укључују већи број додатних зависности (као што су нпр. стишљивост и релација идеалног гаса, промена вискозности или коефицијента провођења топлоте, сложени турбулентни модели итд). Овде је систем дискретизованих једначина решен уз претпоставку нестишљивог, нестационарног и турбулентног струјања. Како проблем опструјавања ротора ветротурбине са вертикалном осом обртања не подразумева ефекте стишљивости флуида ни нарочит пренос топлоте, једначина одржања енергије није ни разматрана, па ни решавана. Међутим, како је струјање моделирано као турбулентно, било је потребно решити додатне једначине којима се описује пренос турбулентних величина.

Метод коначних запремина применљив је на све типове мрежа (структуриране и неструктуриране) и тиме погодан за примену на сложеним и закривљеним геометријама. По својој дефиницији је конзервативан (нема неочекиваних извора и понора у ћелијама). Такође, инжењери га доста користе јер сваки члан који се појављује у једначинама има физичко значење, па се лако разумева и имплементира [27]. Овде је нумерички прорачун извршен у неколико корака:

1. формиран је потребан геометријски модел флуида (прорачунски домен) који окружује ветротурбину (односно, представља контролну запремину флуида који је опструјава),
2. на основу ког је потом генерисана прорачунска мрежа поделом домена на коначан број запремина/ћелија,
3. дефинисани су почетни и гранични услови, карактеристике радног флуида, шеме дискретизације,
4. спроведен је велики број симулација опструјавања ветротурбине у различитим радним условима (при различитим комбинацијама непо ремећене брзине ветра  $V_0$  и угаоне брзине ротора  $\Omega$ ),

5. коначно, извршена је детаљна анализа остварених резултата, пре свега сила које дејствују на лопатицу.

У односу на ветротурбине са хоризонталном осом обртања, специфичност и комплексност опструјавања ветротурбине са вертикалном осом обртања је што је струјна слика изразито асиметрична те лопатица током једне ротације пролази кроз различите нападне углове  $\alpha$ . Тиме су проузрокована променљива (циклична) аеродинамичка оптерећења на лопатици, отцепљење/одвајање струјања по делу путање лопатице, много већи опсег нападних углова, просторне периодичне вртложне структуре итд. Из свега наведеног, могуће је уочити да је аеродинамички прорачун ветротурбине са вертикалном осом обртања методама прорачунске механике флуида захтеван, сложен и треба му озбиљно приступити. То је такође и разлог зашто се многи истраживачи и даље опредељују за раванске анализе што је и приказано у Прегледу литературе.

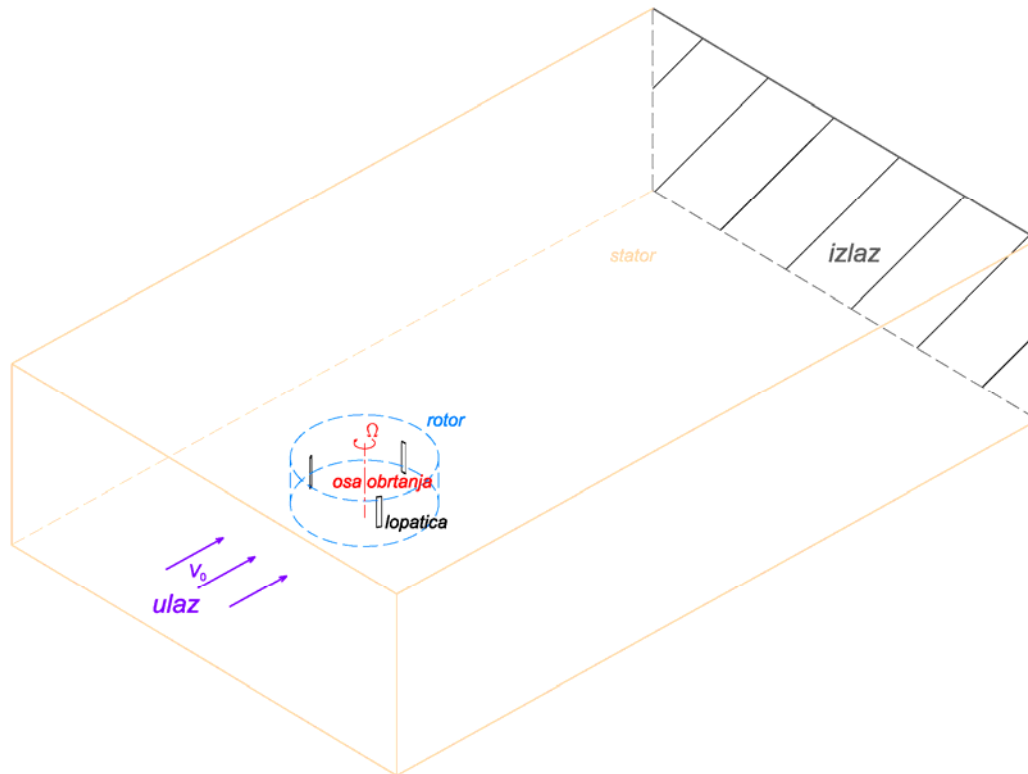
### 3.2.1 Геометријски модел

За потребе аеродинамичког прорачуна 3Д опструјавања ветротурбине са вертикалном осом обртања искоришћен је један од најсложенијих, прорачунски најзахтевнијих, али и најтачнијих доступних модела тзв. модел „клизајућих мрежа” (sliding mesh) [173]. Код овог приступа, прорачунски домен мора садржати макар два независне зоне/региона (нпр. статор и ротор) раздвојене граничном површином – интерфејсом. Између две или више флуидних зона постоји релативно (транслаторно или ротационо) кретање, док само кретање зона одговара кретању крутог тела. Односно, није дозвољена деформација зона (померање чворова једног у односу на други унутар зоне), већ само глобално кретање целе зоне. Додатни потребан услов за успешан прорачун (да би флуид могао да тече) је да током трајања кретања, две зоне све време буду у контакту, клизе једна по другој, по граничној површини јер се по њој и обавља транспорт величина поља. Уз дефиницију обртног кретања зоне око лопатица, где се у сваком временском кораку покретни део домена помера за један угаони померај  $\Delta\theta$ , овакав приступ омогућава разрешење нестационарног опструјавања лопатица ветротурбине и интеракцију две прорачунске зоне. Нарочито је погодан када је

потребно познавање струјне слике у сваком временском тренутку (као што је овде случај јер је потребно стално познавање тачних вредности аеродинамичких сила које делују на лопатицу), у односу на осредњене вредности величина поља током једне ротације. При спровођењу оваквог прорачуна потребно је:

- да струјање буде нестационарно,
- правилно дефинисати граничну површ између зона између којих постоји релативно кретање (у случају обртног кретања, облик граничне површине мора одговарати спољашњој граници ротационог тела),
- дефинисати одређену (константну или променљиву у времену) брзину кретања макар једне зоне прорачунског домена (мада је могуће разматрати и више независних кретања),
- доделити одређену брзину кретања и чврстим површинама/зидовима који се налазе унутар покретне зоне.

Укупни прорачунски домен је облика квадра који се простира „далеко” око ветротурбине. У конкретном случају:  $-3R$  испред и  $+11R$  иза ветротурбине у подужном  $x$ -правцу, по  $\pm 4R$  у попречном  $y$ -правцу, и по  $\pm 2L$  изнад и испод ветротурбине у вертикалном  $z$ -правцу, слика 3.3. Ова величина спољашњег прорачунског домена довољна је за рекулерацију ваздушне струје, односно за потеривање ефеката који ротор има на непо ремећену брзину ветра. Прорачунски домен се састоји из две независне зоне, при чему је унутрашњи ротор облика цилиндра у непосредној близини лопатица. Како је основни циљ истраживања оптимизација лопатице ветротурбине, пратећи елементи као што је вратило, носачи лопатица, генератор и сл. нису обухваћени овом аеродинамичком анализом већ је симулирано само струјање око три праве лопатице. Иначе, у раду [138] разматран је и утицај централног вратила, али како је у питању витак цилиндар довољно удаљен од лопатица, његов утицај на глобалне карактеристике ветротурбине заиста је занемарљив. Сличан закључак може се извући и за аеропрофилсане носаче јер они углавном леже само у две попречне равни. Генератор и остале пратеће компоненте електричног система најчешће се постављају у дно конструкције услед чега је њихов утицај на струјну слику око лопатица безначајан, нарочито уколико су у питању лопатице веће дужине.



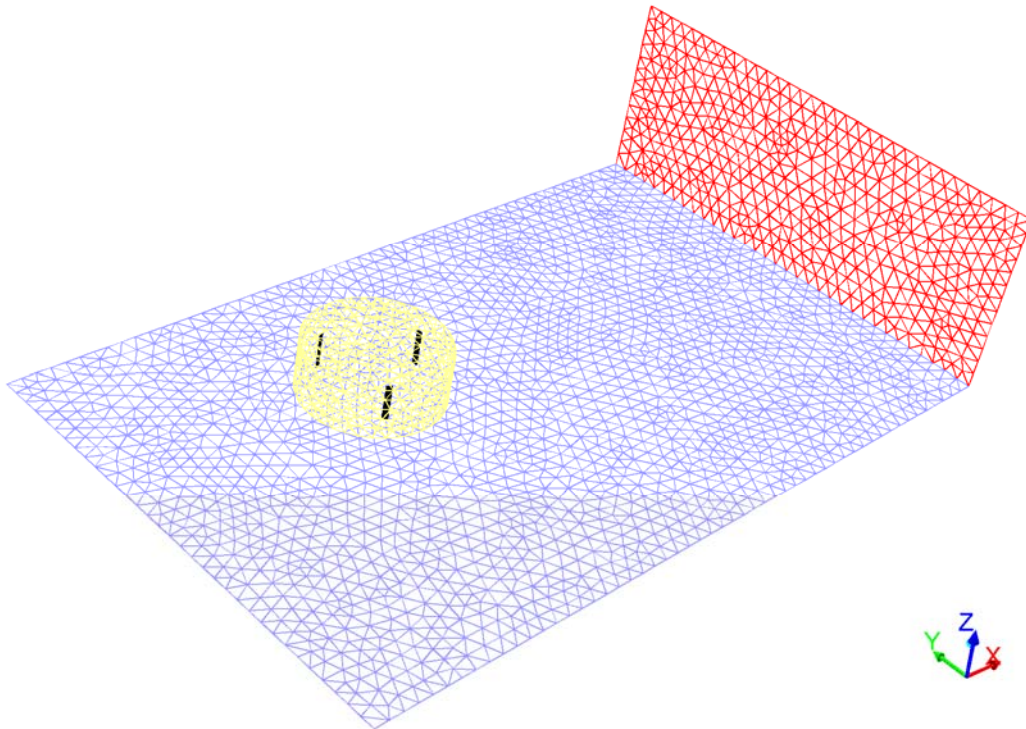
Слика 3.3. Границе и делови прорачунског домена

### 3.2.2 Прорачунска мрежа

Након спровођења студије конвергенције прорачунске мреже (и њене валидације, односно обезбеђења да њена густина и карактеристике не утичу на резултате прорачуна) коначно је усвојена хибридна неструктурирана прорачунска мрежа која садржи приближно 3.2 милиона призматичних ћелија, слика 3.5. Неструктурирана мрежа је одабрана јер је флексибилнија за коришћење и могуће ју је много брже и лакше (аутоматски) генерисати у односу на структурирану. Код овог типа мреже нема ограничења у броју темена ћелије и дозвољена је употреба различитих облика ћелија (тетраедри, хексаедри у 3Д проблемима), као и локалног уситњавања мреже. Мана може бити нешто спорија конвергенција јер је формиран систем једначина неуређенији и структура мреже не мора пратити специфичности струјног тока. Из тог разлога, а да би се што тачније симулирало струјање око лопатица (тачније, у граничном слоју који се око њих јавља)

дефинисани су и танки слојеви ћелија око лопатица чиме је прорачунска мрежа постала и хибридна.

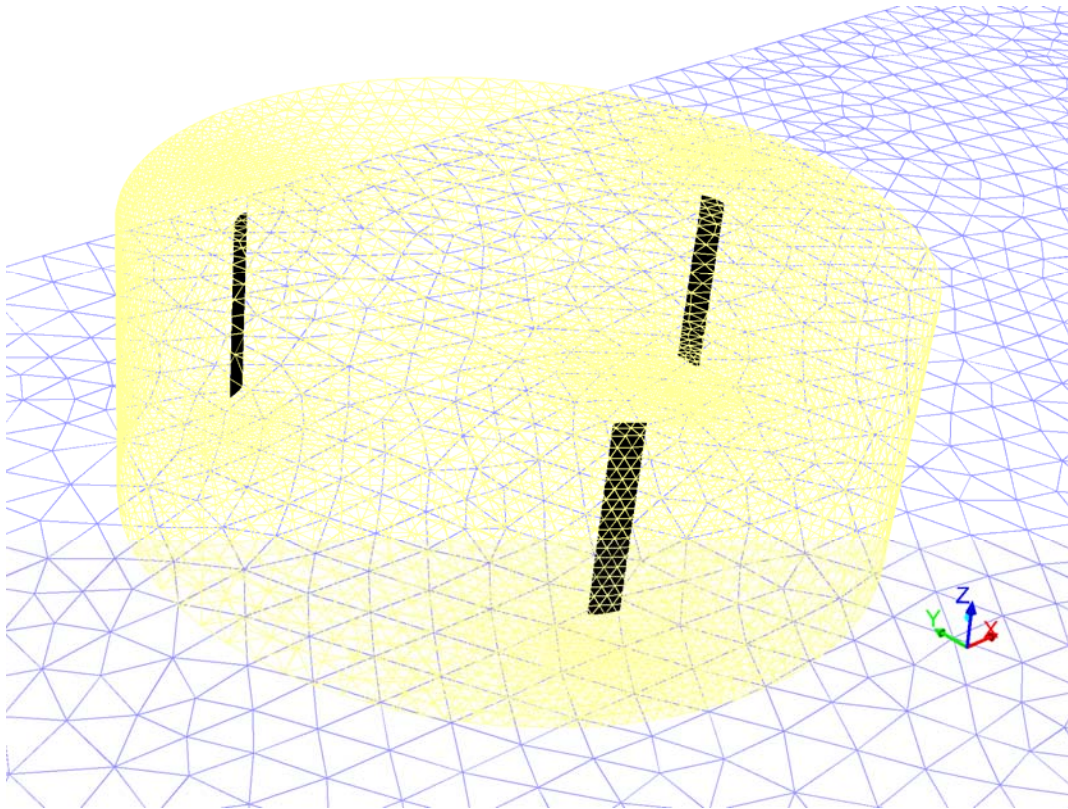
Мрежа је знатно финија по унутрашњој ротирајућој зони – ротору (приказан жутом бојом на сликама 3.4 и 3.5) јер се највеће и најзначајније промене струјног поља дешавају управо око зидова тј. лопатица. Величина ћелија повећава се ка спољашњим границама, слике 3.4 и 3.5, где струјање све више личи на непо ремећено, а да би се остварила одређена уштеда у потребним прорачунским ресурсима.



Слика 3.4. Прорачунска мрежа по границама прорачунског домена

Слика 3.5 приказује увеличану ротирајућу зону око лопатица, док слика 3.6 приказује одређене глобалне параметре прорачунске мреже дефинисане у програмском пакету за генерисање мрежа ANSYS Mesher [176]. Слика 3.6а потврђује да је мрежа прилагођена солверу ANSYS FLUENT који следи, док слика 3.6б приказује стварне вредности и функције величина ивица и страница ћелија по целом прорачунском домену. Слика 3.6в наведен је укупан број чворова и ћелија у домену (795439 и 3163080 редом), као и један од могућих

квантификатора квалитета ћелија. У питању је глобални параметар чија вредност може бити из интервала  $[0, 1]$ . Вредност 1 имплицира да је у питању правилна ћелија – коцка, док вредности блиске 0 указују на неквалитетне ћелије. Вредност једнака 0 значила би да у домену постоје ћелије негативне запремине што је недопустиво за прорачун. Међутим, у овом случају, када је створен одређен проценат издужених призматичних елемената који представљају гранични слој око лопатица, могло се очекивати да ће њихов квалитет бити низак (услед веома мале дебљине/висине елемената). Са друге стране, њихов удео у укупном броју ћелија није висок, па је средња вредност квалитета елемената приближно једнака 0.635, а стандардна девијација 0.361 што се може сматрати задовољавајућим.



Слика 3.5. Прорачунска мрежа по граничној површини између две зоне

Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
<input type="checkbox"/> Relevance	100

a)

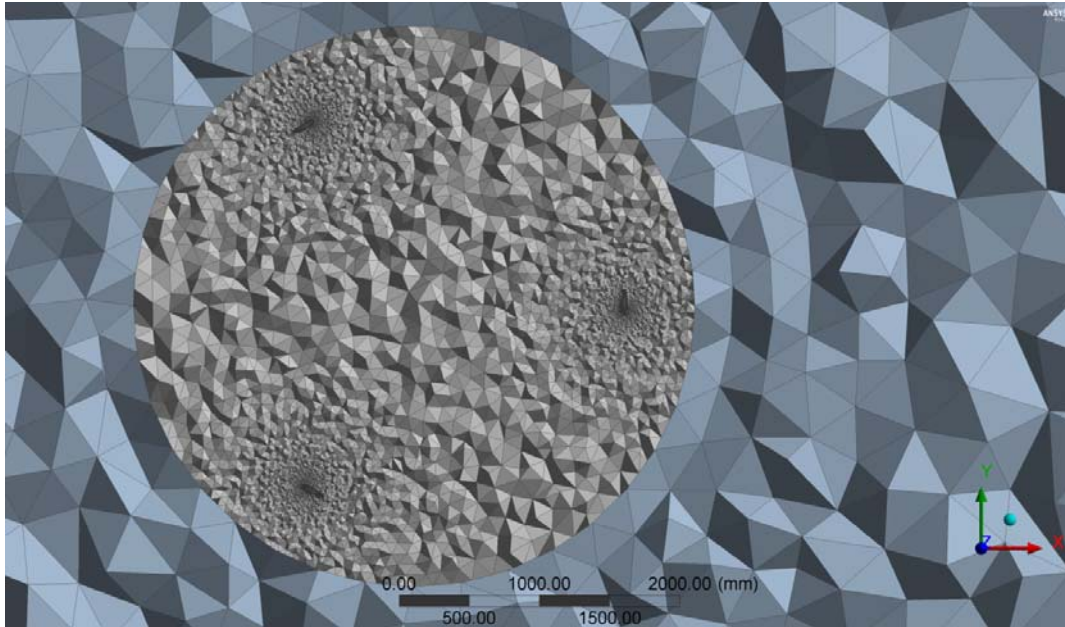
Sizing	
Use Advanced Si...	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Medium
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Nor...	Default (12.0 °)
<input type="checkbox"/> Num Cells Acr...	Default (5)
Proximity Size Fu...	Faces and Edges
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (4.5205e-003 m)
<input type="checkbox"/> Proximity Min ...	Default (4.5205e-003 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (0.452050 m)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (0.904090 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.10 )
б) <input type="checkbox"/> Minimum Edge L...	0.155750 m

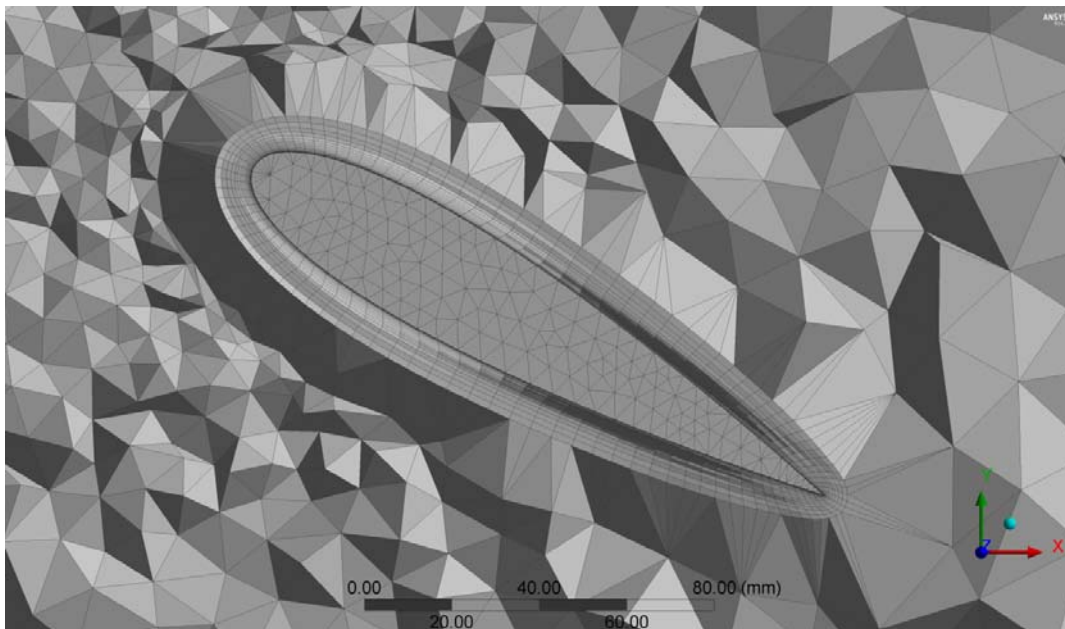
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	795439
<input type="checkbox"/> Elements	3163080
Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	8.3303e-005
<input type="checkbox"/> Max	1.
<input type="checkbox"/> Average	0.63507
в) <input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.3609

Слика 3.6. Глобални параметри прорачунске мреже: а) подешавања за солвер, б) функције величине ћелија по целом домену, в) укупан број и квалитет ћелија

Функције променљиве величине елемената дефинисане су дуж тетива  $c$  и распона  $L$  лопатица да би се обезбедила већа финоћа/резолюција мреже у близини нападне и излазне ивице аеропрофила као и на крајевима лопатица, слика 3.7. Ради што тачнијег разрешења граничног слоја, око лопатица је створено  $N = 20$  слојева призматичних ћелија променљиве дебљине (фактор раста дебљине ћелија је  $q = 1.2$ ), слика 3.8. Дебљина првог слоја ћелија непосредно уз зид лопатице је  $y_1 = 0.05 \text{ mm}$ , чиме је остварена вредност бездимензионалне удаљености од зида  $y^+ \approx 1$ . Опет, ова вредност је у складу са генералном пропоруком  $y^+ < 5$  којом се омогућава разрешење струјања у граничном слоју, уместо коришћења одређених апроксимативних функција.



Слика 3.7. Попречни пресек прорачунске мреже где су јасно видљиви спољашњи, непокретан и унутрашњи, покретан регион



Слика 3.8. Гранични слој око лопатице



### 3.2.3 Прорачунска поставка

Посматрано опструјавање је просторно (3Д), нестационарно и турбулентно. Флуид је сматран нестишљивим, односно његова густина је непроменљива током прорачуна,  $\rho = \text{const}$ . Ово је сасвим валидна претпоставка јер су и обртна  $\Omega R$  и брзина ветра  $V_0$  релативно мале, око 20-30 m/s, па је тог реда величине и њихов векторски збир који одговара релативној брзини која надолази на лопатицу. Дакле, радни флуид је ваздух константне густине  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$  и динамичке вискозности  $\mu = 1.798 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ .

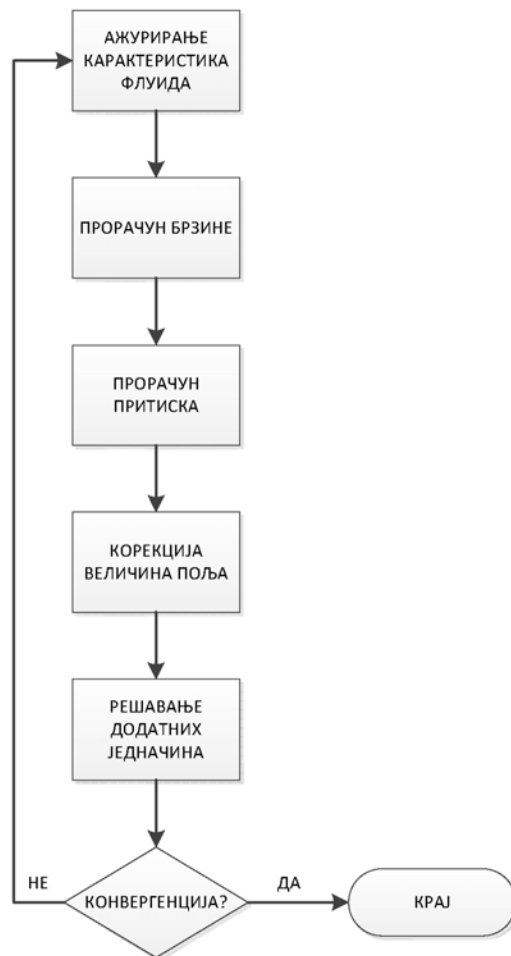
За затварање Навије-Стоксових једначина осредњених Рејнолдсовом статистиком коришћен је двоједначински  $k-\omega$  SST турбулентни модел заснован на Бусинесковој хипотези да су Рејнолдсови турбулентни напони (који се јављају као последица осредњавања Навије-Стоксових једначина) сразмерни турбулентној вискозности  $\mu_t$  (која је карактеристика струјања, а не флуида). Изведен је као комбинација стандардног  $k-\omega$  модела у близини зидова и  $k-\varepsilon$  модела у остатку прорачунског домена. Генерално је поузданији од стандардног  $k-\omega$  турбулентног модела и јако је заступљен у ваздухопловним проблемима [177].

Унутрашња зона, ротор, се у свим разматраним прорачунским случајевима обрће константном угаоном брзином  $\Omega = 200 \text{ obrt/min} = 20.94395 \text{ rad/s}$  што проузрокује обртну/тангенцијалну брзину лопатице  $V_T = \Omega R = 31.416 \text{ m/s}$ . Различитост радних режима постигнута је варирањем непоремећене брзине ветра у опсегу  $6 \text{ m/s} \leq V_0 \leq 18 \text{ m/s}$  дефинисане по спољашњим границама прорачунског домена (улазним површинама). По јединој излазној страници дефинисана је нулта вредност натпритиска. Коришћене су препоручене вредности турбулентних величина по спољашњим границама. Интензитет турбуленције, који представља однос флукутирајуће и средње вредности брзине, претпостављен је као  $t = 5\%$  (што би одговарало мирној атмосфери). По стандардима, уобичајене вредности за „прљавију” (променљиву, нестабилну) брзину ветра су 16-18%. Релативна турбулентна вискозност износи  $\mu_t/\mu = 10$  (препоручене вредности за спољашње струјање су између 1 и 10). Зидови лопатица претпостављени су као ротирајући уз услов да је на њима брзина једнака 0.

Коришћен је сегрегатни солвер који појединачно решава поље притиска и брзине. Иначе, решавање формираног система једначина додатно компликује чињеница да не постоји независна једначина за притисак, већ његов градијент учествује у једном члану векторске једначине одржања количине кретања. Зато се три компоненте брзине израчунавају из једначине одржања количине кретања, док се вредност притиска у свакој ћелији рачуна из модификоване једначине одржања масе (тачније производа једначина одржања масе и количине кретања). Како су у питању нелинеарне и међусобно спрегнуте једначине потребно их је итеративно решити да би се дошло до конвергираних вредности величина поља, овде притиска  $p$ ,  $x$ -компоненте брзине  $u$ ,  $y$ -компоненте брзине  $v$  и  $z$ -компоненте брзине  $w$  и одговарајућих, додатих турбулентних величина – кинетичке енергије турбуленције  $k$  и њене специфичне дисипације  $\omega$ , у сваком елементу/ћелији прорачунског домена. Једначине се решавају редом, једна по једна, независно или итито одвојено, одакле и проистиче назив сегрегатни. Предност овог приступа је што захтева мање меморијског простора, односно мање прорачунске ресурсе (јер се у једном тренутку решава само једна величина поља), али је уједно и један од његових основних недостатака спорна конвергенција [173]. Ток једног прорачунског корака илустрован је на слици 3.9, а укратко се може описати кроз следеће кораке:

1. Прорачун нових, тренутних вредности карактеристика флуида, као што су густина  $\rho$ , динамичка вискозност  $\mu$  и сл, на основу претходних вредности величина поља. У случају невискозног опструјавања ветротурбине са вертикалном осом обртања, овај корак спроводи се само једном, на почетку прорачуна, јер су карактеристике флуида претпостављене као константне.
2. Прорачун три компоненте брзине из векторске једначине одржања количине кретања.
3. Прорачун поља (корекције) притиска помоћу модификоване једначине и свеже-израчунатих компоненти брзине.
4. Корекција претходно израчунатих величина поља, овде притиска и компоненти брзине.

5. Прорачун додатних једначина. У овом случају, решавају се две непознате турбулентне величине  $k$  и  $\omega$ , из својих транспортних једначина, а помоћу коригованих вредности притиска и три компоненте брзине у свакој ћелији.
6. Провера конвергенције. Начелно, решавање стационарних проблема тече док је апсолутна вредност или квадрат разлике између тренутних и претходних вредности већи од неке, унапред задате мале вредности, тзв. грешке прорачуна  $\varepsilon$ . У случају нестационарних али периодичних проблема опструјавања, као што је овај разматрани, прорачун се најчешће спроводи док се не постигне периодично понављање неке величине од интереса (овде аеродинамичких коефицијената ротора). У случају аперодично нестационарних проблема, прорачун се најчешће спроводи до истека унапред задатог времена.



Слика 3.9. Ток прорачуна код сегрегатног солвера

Купловање поља притиска и брзине, које је неопходно да би се она тачније решила, реализовано је SIMPLEC (акроним од Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent) шемом (у питању је модификација SIMPLE шеме. Како се првим решењем компоненти брзине (у кораку 2) не задовољава модификована једначина одржања масе потребно је увести одређене корекције (корак 3), и наново израчунати поље брзине и притиска (корак 4).

Све просторне дискретизационе шеме су 2. реда јер она у највећем броју проблема доводи до решења задовољавајуће тачности (код шема 1. реда може бити присутна нумеричка дифузија/расипање нумеричког решења и одступање од тачног). Поред поменутих просторних, и временска (четврта) координата (независна променљива) мора бити дискретизована. Последице нестационарности опструјавања, тј. промене величина струјног поља у времену, апроксимирани су шемама 1. реда (најпростија шема, задовољавајуће тачности за већину инжењерских проблема за довољно ситне временске кораке). Како је период једне ротације  $T = 2\pi\omega = 0.3 \text{ s}$ , за вредност једног временског корака усвојена је вредност  $dt = T/72 = 0.004167 \text{ s}$  која одговара угаоном померају од  $\Delta\theta = 5^\circ$ . Број итерација по временском кораку је 10. Прорачуни су вршени у трајању од 10 обртаја, до постизања квази-конвергенције (периодичног понављања) аеродинамичких коефицијената сила и момента.

На крају, треба поменути и нека ограничења спроведеног прорачуна:

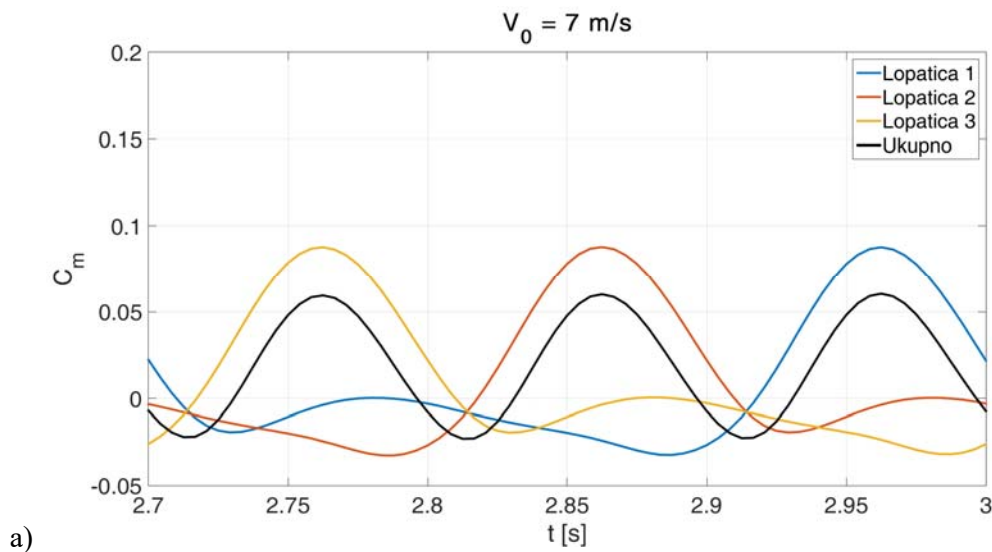
- Није разматрана вертикална варијација брзине ветра  $V_0$  што је уобичајено за објекте који раде у атмосферском граничном слоју. Међутим, ове лопатице ветротурбине су кратке (дужине  $L = 1 \text{ m}$ ) па се може сматрати да нема велике промене брзине по висини ротора уколико је он довољно удаљен од површине земље.
- Није урачунат утицај централног вратила јер је коефицијент испуне ротора мали и лопатице су довољно удаљене од осе обртања. Односно, може се сматрати да уколико и дође до било каквог одвајања вртлога иза вратила, тај утицај на струјну слику око лопатица је занемарљив.
- Лопатице су сматране крутим. Ова претпоставка значајно упрошћава прорачун, а прилично је и блиска реалности. Наиме, иако су лопатице

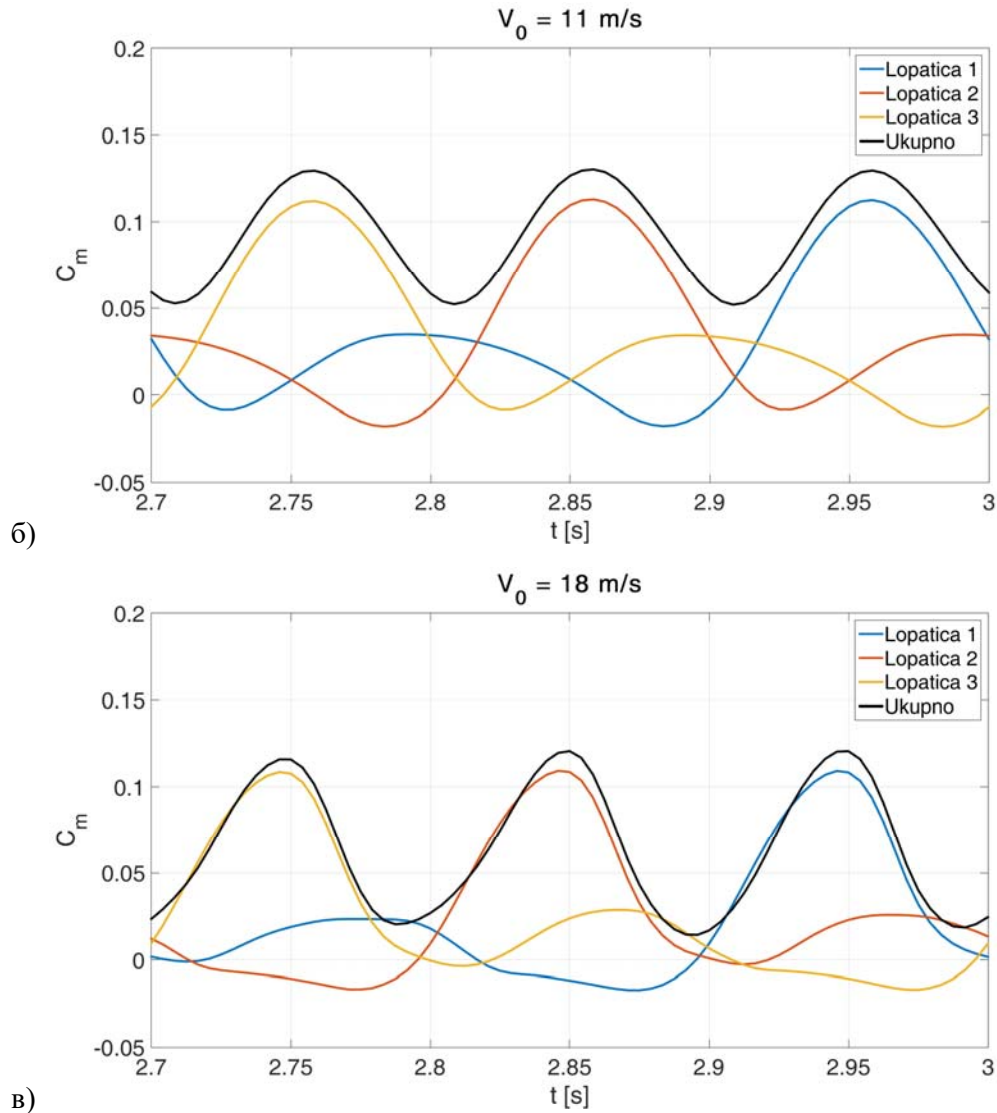
велике виткости, одабрани начин ослањања у две тачке не дозвољава значајне деформације, односно померања лопатице.

- Кроз 3Д нумерички прорачун, у разматрање је уведено и постојање крајева лопатица као и резултујућа подужна расподела притиска по лопатици.

### 3.2.4 Анализа и приказ резултата

Један од основних резултата прорачуна (који директно одређује механичку снагу ветротурбине) је променљиви коефицијент обртног момента  $C_m$  приказан на слици 3.10 за три репрезентативна радна режима, при непоремећеним брзинама ветра  $V_0 = 7 \text{ m/s}$ ,  $V_0 = 11 \text{ m/s}$  и  $V_0 = 18 \text{ m/s}$ , односно у којима је коефицијент рада једнак  $\lambda = 4.488$ ,  $\lambda = 2.856$  и  $\lambda = 1.745$ , редом. Укупни момент на централном вратилу представља суму доприноса сваке од три постојеће лопатице. Приказани резултати бележени су током 10. ротације ротора ветротурбине, када се може сматрати да је постигнута квази-конвергенција резултата. Приметно је да са променом радног режима долази до промена и средње вредности и амплитуде и облика криве коефицијента момента (варијабилност и асиметричност постају израженије при већим брзинама ветра).

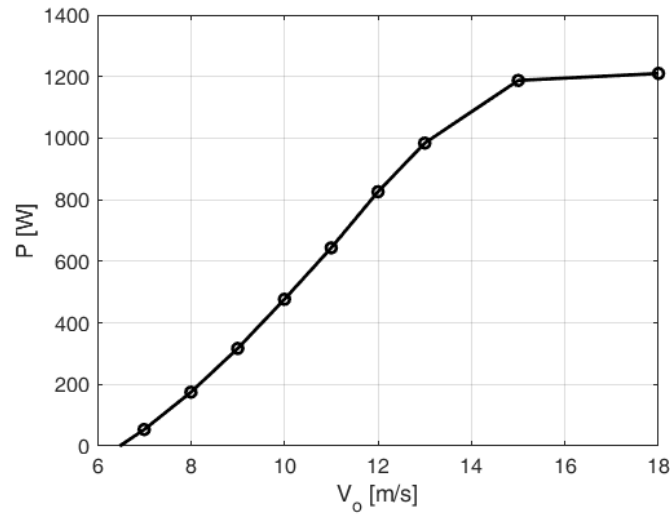




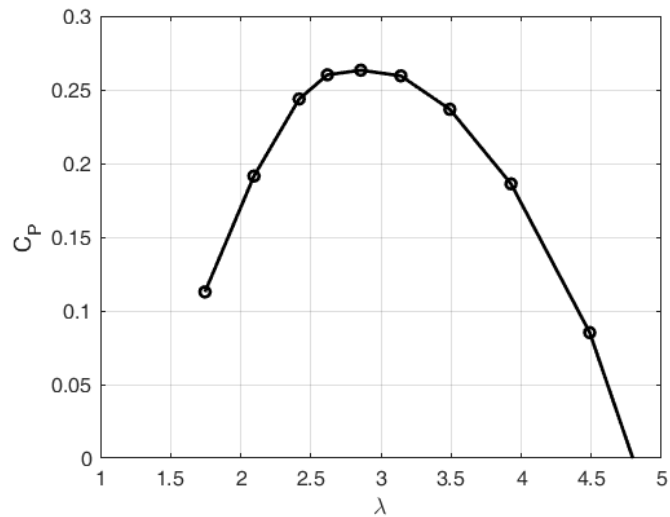
Слика 3.10. Појединачни и укупни коефицијент момента током једне ротације за:

а)  $\lambda = 4.488$ , б)  $\lambda = 2.856$ , в)  $\lambda = 1.745$

Глобалне карактеристике/параметри ветротурбине: снага са променом брзине  $P(V_0)$  приказана на слици 3.11 и коефицијент снаге са променом коефицијента рада  $C_p(\lambda)$  илустрован на слици 3.12, изведене су на основу осредњених вредности укупног коефицијента момента око осе ротације лопатица током једне (последње) ротације.



Слика 3.11. Крива снаге ветротурбине  $P$  у зависности од брзине ветра  $V_0$



Слика 3.12. Крива коефицијента механичке снаге ветротурбине  $C_P$  у зависности од коефицијента рада  $\lambda$

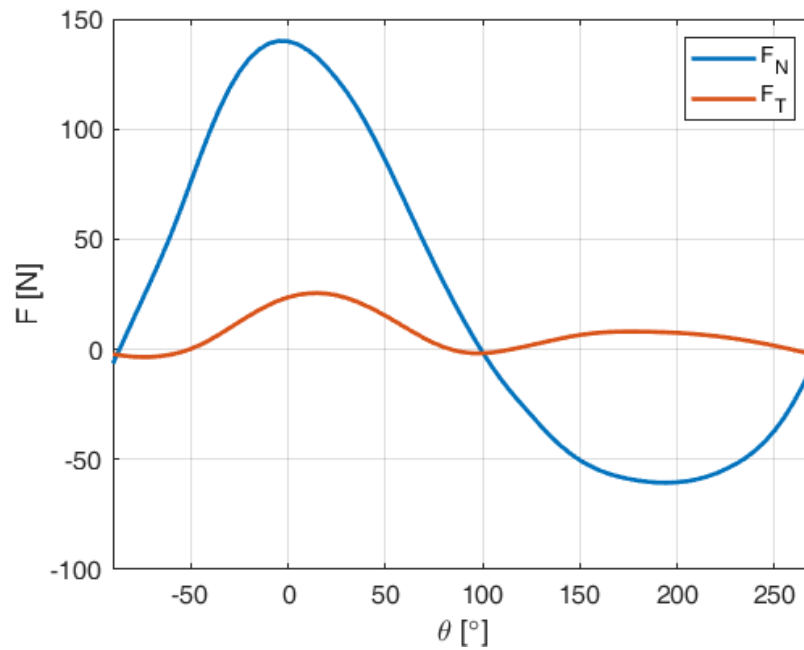
Анализом графика на слици 3.12 може се закључити да је максимални очекивани коефицијент снаге  $C_{P,max} = 0.2633$  могуће остварити при оптималном коефицијенту рада  $\lambda_{opt} = 2.856$  (што одговара непоремећеној брзини ветра од  $V_0 = 11$  m/s и константној угаоној брзини ротора  $\Omega = 200$  obrt/min). Ова вредност, иако релативно мала, задовољавајућа је за овај (максимално упрошћен) тип ветротурбине и у складу је са вредностима других аутора [58,60,143,148,157].

Ефикасност ветротурбине могуће је поправити одређеним усложњавањем конструкције као што су: већа дужина лопатица (да би се смањили губици на крајевима), просторним (параболичким, хеликоидном) обликом лопатица (чиме се производни процес значајно компликује и поскупљује), додавањем турбулизатора или закрилаца по лопатици, допуштањем закретање лопатице итд. Све ове модификације захтевају додатне, детаљне аеродинамичке анализе.

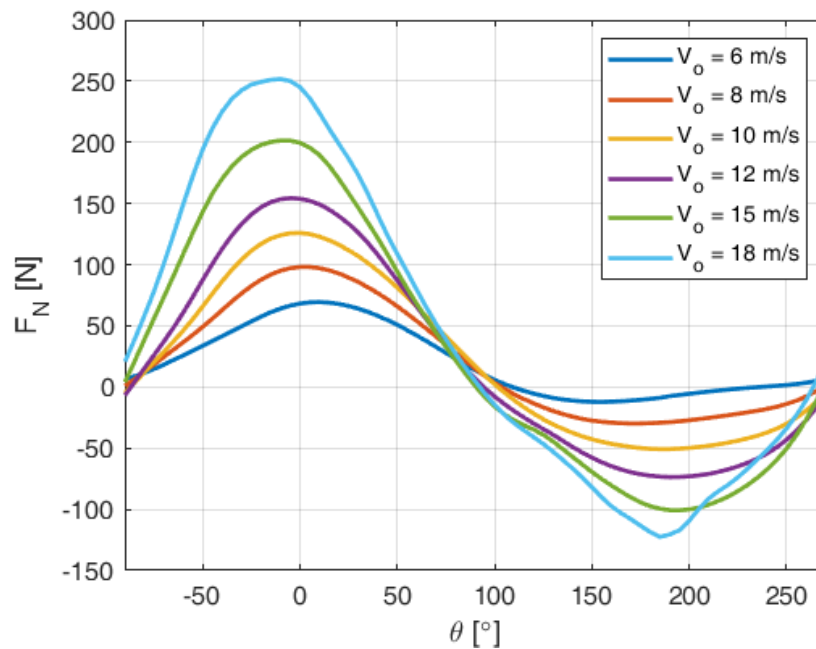
Дијаграм на слици 3.11 пружа увид у апсолутне вредности снаге које је могуће остварити (при номиналној брзини ветра  $V_0 = 11 \text{ m/s}$  која одговара оптималном коефицијенту рада могуће је генерисати око  $P = 644 \text{ W}$  механичке снаге при усвојеном броју обртаја). Минимална брзина при којој долази до производње енергије је приближно  $V_{\text{cut-in}} \approx 6.5 \text{ m/s}$  (ову вредност могуће је редуковати смањењем угаоне брзине обртања  $\Omega$ , односно имплементацијом одређеног управљачког алгоритма). Са друге стране, са повећањем брзине ветра преко  $15 \text{ m/s}$  није могуће остварити значајније повећање генерисане снаге без додатне регулације.

Током рада лопатица ветротурбине са вертикалном осом обртања трпи гравитациона, аеродинамичка и инерцијална (центрифугална) оптерећења. Док се за гравитациона и центрифугална може сматрати да су стална, аеродинамичка су изразито променљива. Циклична промена аеродинамичких оптерећења током једне ротације, одакле се јасно уочава разлика „узводног“ ( $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ) и „низводног“ ( $90^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$ ) дела путање лопатице (у складу са нотацијом на слици 3.1), у оптималном радном режиму ( $\lambda = 2.856$ ) приказана је на слици 3.13. Промене нормалне и тангенцијалне силе и у другим разматраним радним режимима илустроване су на сликама 3.14 и 3.15.

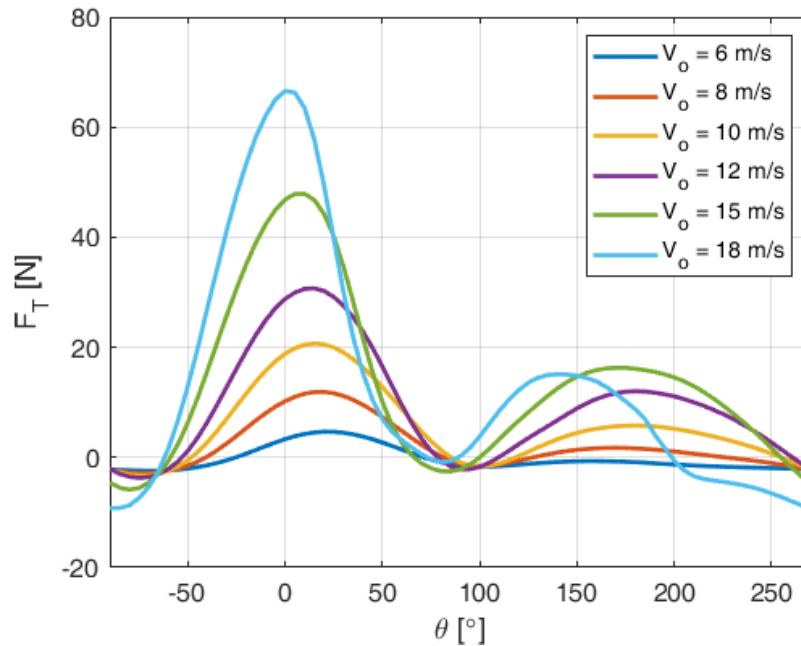




Слика 3.13. Промене нормалне  $F_N$  и тангенцијалне силе  $F_T$  које делују на једну лопатицу при коефицијенту рада  $\lambda_{\text{opt}} = 2.856$



Слика 3.14. Промена нормалне силе  $F_N$  која делују на једну лопатицу при различитим коефицијентима рада  $\lambda$  (брзинама ветра  $V_0$ )



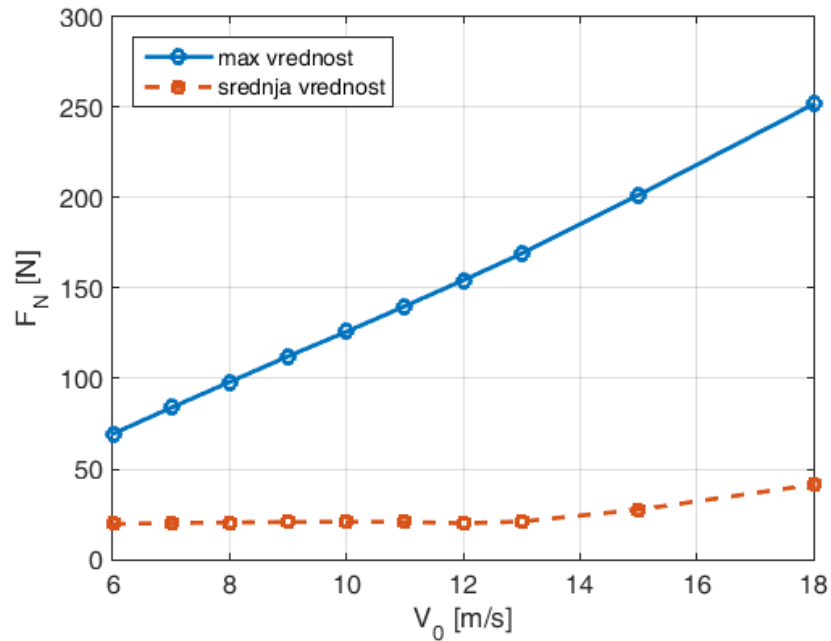
Слика 3.15. Промена тангенцијалне силе  $F_T$  која делују на једну лопатицу при различитим коефицијентима рада  $\lambda$  (брзинама ветра  $V_0$ )

Како су вредности сила током једног обртаја изразито променљиве потребно је усвојити неку референтну вредност (максималну или средњу, илустроване на сликама 3.16 и 3.17) за дефинисање и димензионисање унутрашње структуре лопатице ветротурбине. Зарад додатне сигурности, димензионисање композитне структуре лопатице извршено је на основу максималних вредности аеродинамичких сила које делују на лопатицу при максималној разматраној непоремећеној брзини ветра од  $V_0 = 18$  m/s, односно вредности:

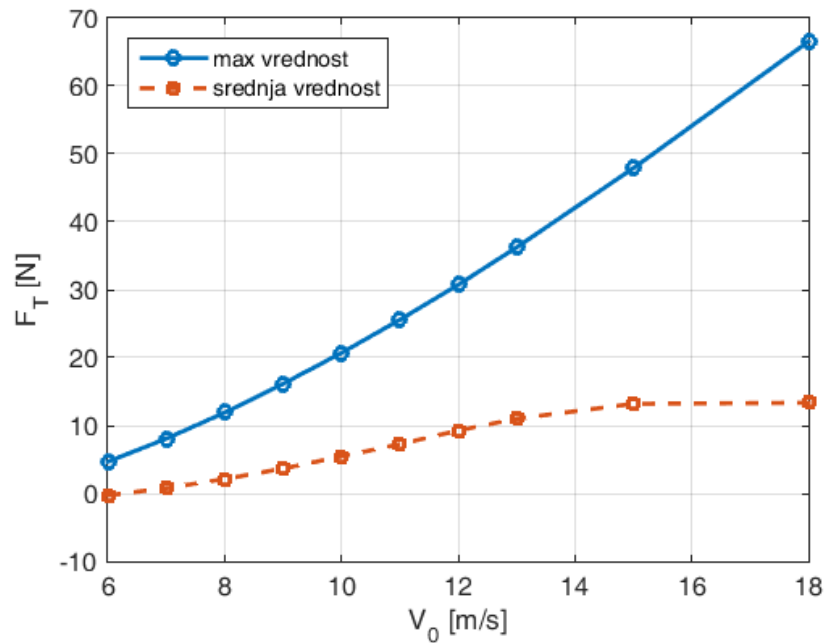
- $F_N = 251.8$  N и
- $F_T = 66.6$  N,

које су заједно са масеним,  $mg$ , и инерцијалним силама,  $mR\Omega^2$ , распоређене по лопатици дуж три координатне осе. Ове вредности су више од оних прописаних међународним стандардом ИЕС 61400-1 којим се препоручује да структура лопатице буде таква да може издржати аеродинамичка оптерећења у екстремним условима ветра  $V_0 = 50$  m/s и закоченом положају (ротор мирује). Тада је нормална сила по лопатици:

$$F_N = 1.5 \cdot \frac{\rho V_0^2}{2} \cdot cL = 344.5 \text{ N.} \quad (3.1)$$

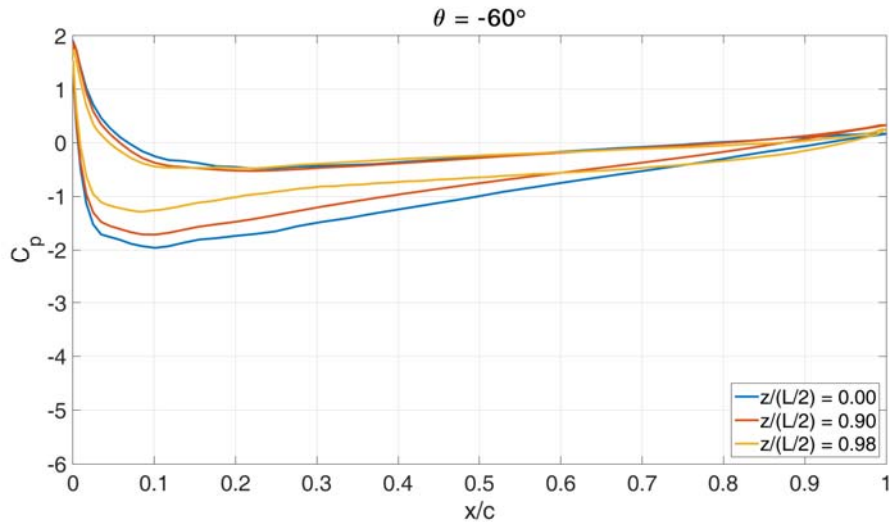


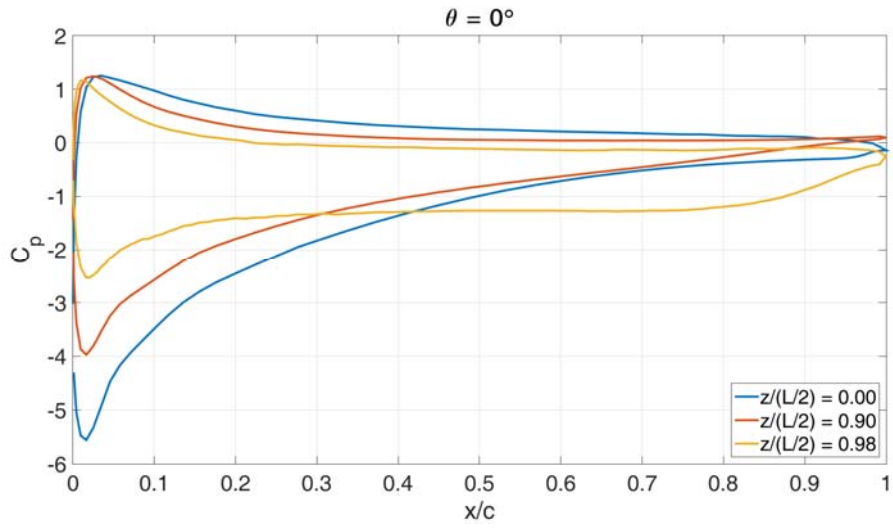
Слика 3.16. Промене максималне и средње вредности нормалне силе која делује на једну лопатицу током једног обртаја при различитим брзинама ветра



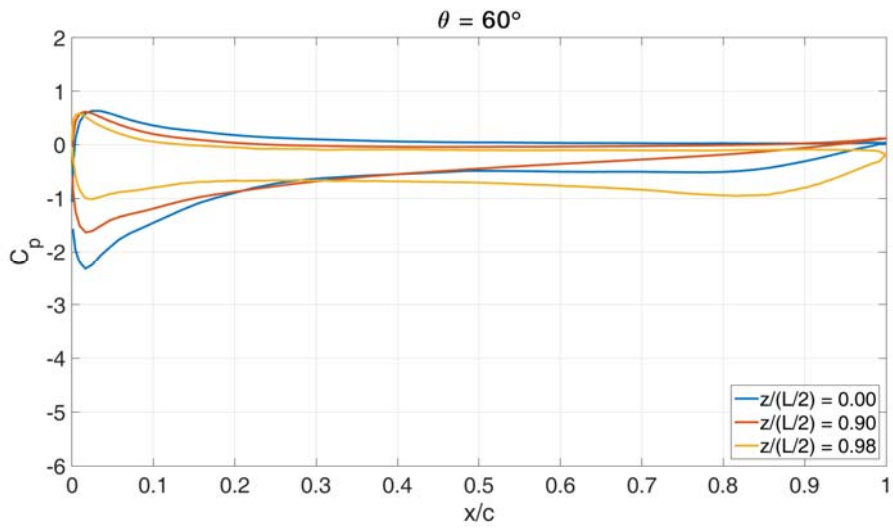
Слика 3.17. Промене максималне и средње вредности тангенцијалне силе која делује на једну лопатицу током једног обртаја при различитим брзинама ветра

Расподела коефицијента притиска при оптималном коефицијенту рада ( $\lambda = 2.856$ ) у три попречне равни по лопатици (средишњој  $z/(L/2) = 0$  и две у близини крајева  $z/(L/2) = 0.90$  и  $z/(L/2) = 0.98$ ) и шест различитих угаоних положаја равномерно распоређених по ротору приказана је на слици 3.18. Приказани прорачунати коефицијент притиска  $C_p$  изведен је из вредности статичког натпритиска по површини лопатице и скалиран вредношћу динамичког притиска израчунатог из обртне компоненте брзине јер она представља доминантни део релативне брзине. Приметна је значајна циклична промена аеродинамичких сила по лопатици током једне ротације. Аеродинамички најповољнији угаони положај је око  $\theta \approx 0^\circ$ , што одговара средини напредујуће половине ротора, када су аеродинамички доприноси највећи. Струјна слика се потом значајно деградира око  $\theta \approx 60^\circ$  и  $\theta \approx 120^\circ$ , полако рекуперира око  $\theta \approx 180^\circ$ , поново квари око  $\theta \approx 240^\circ$ , након чега следи њено устаљивање и понављање читавог процеса. Иако утицај крајева постоји, слика 3.18 такође потврђује да је присутан само у непосредној близини врхова лопатице.

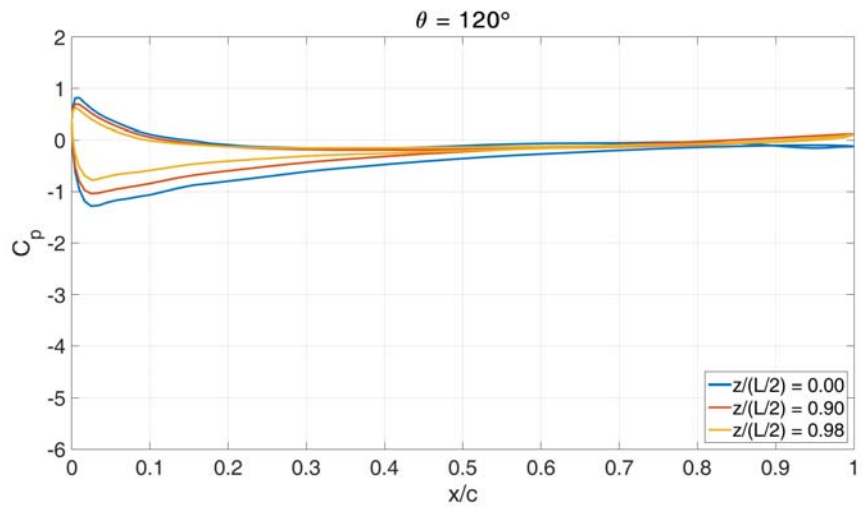




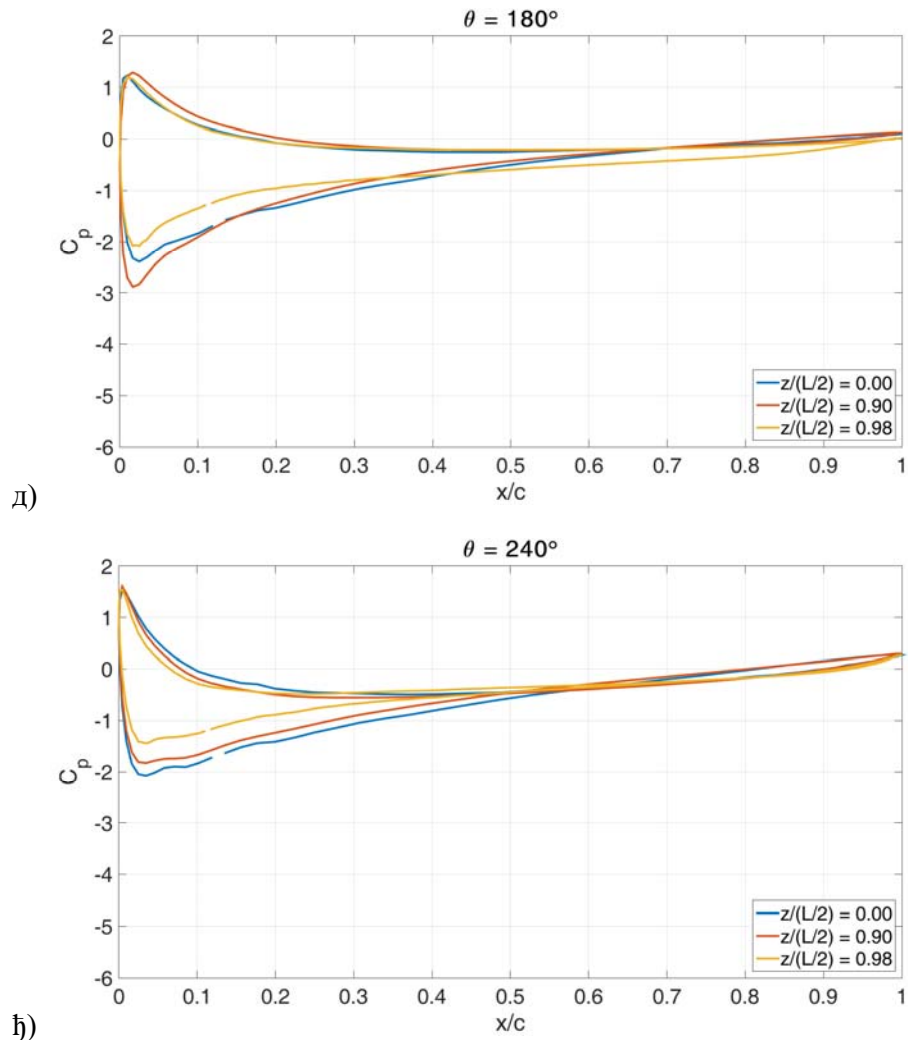
б)



в)



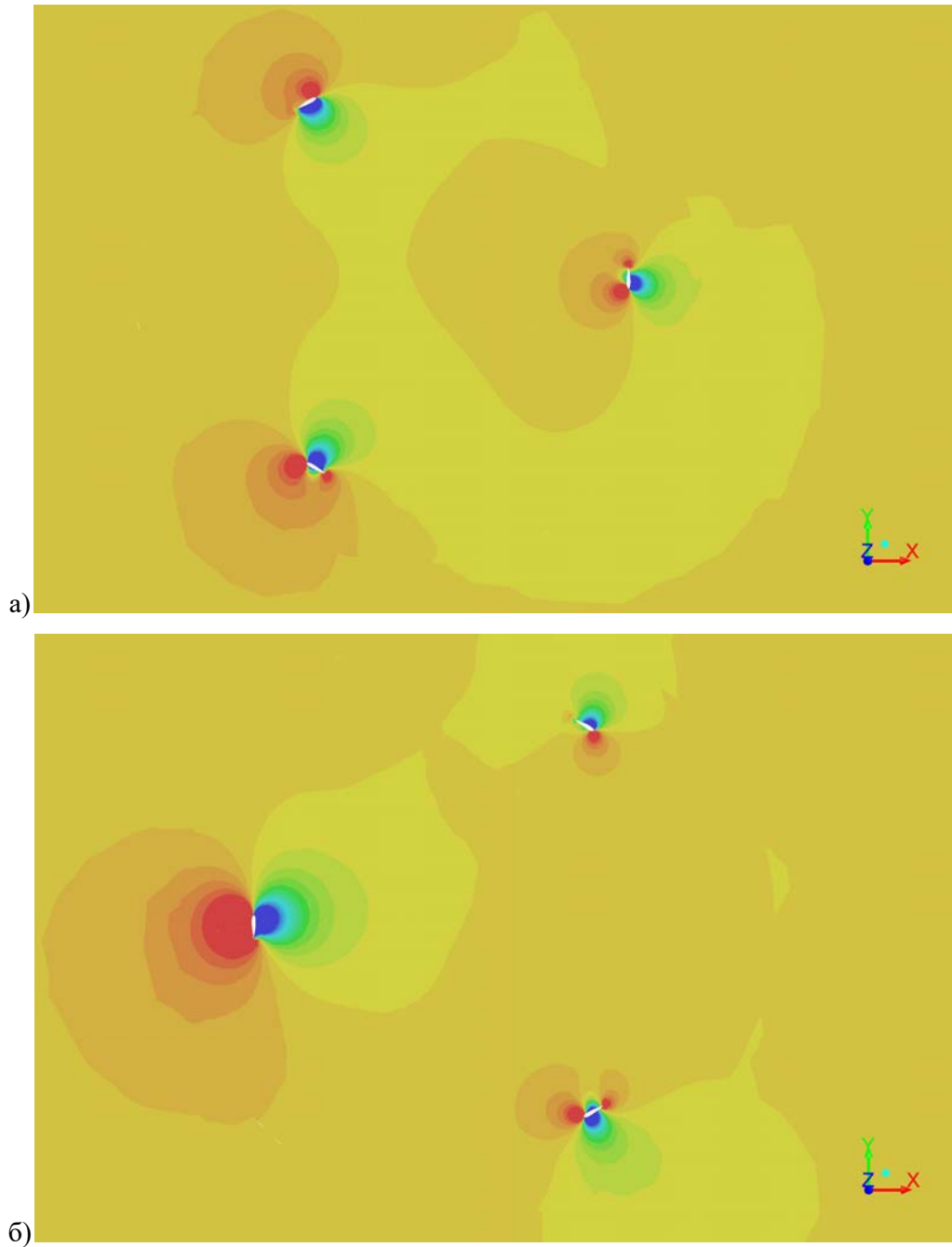
г)



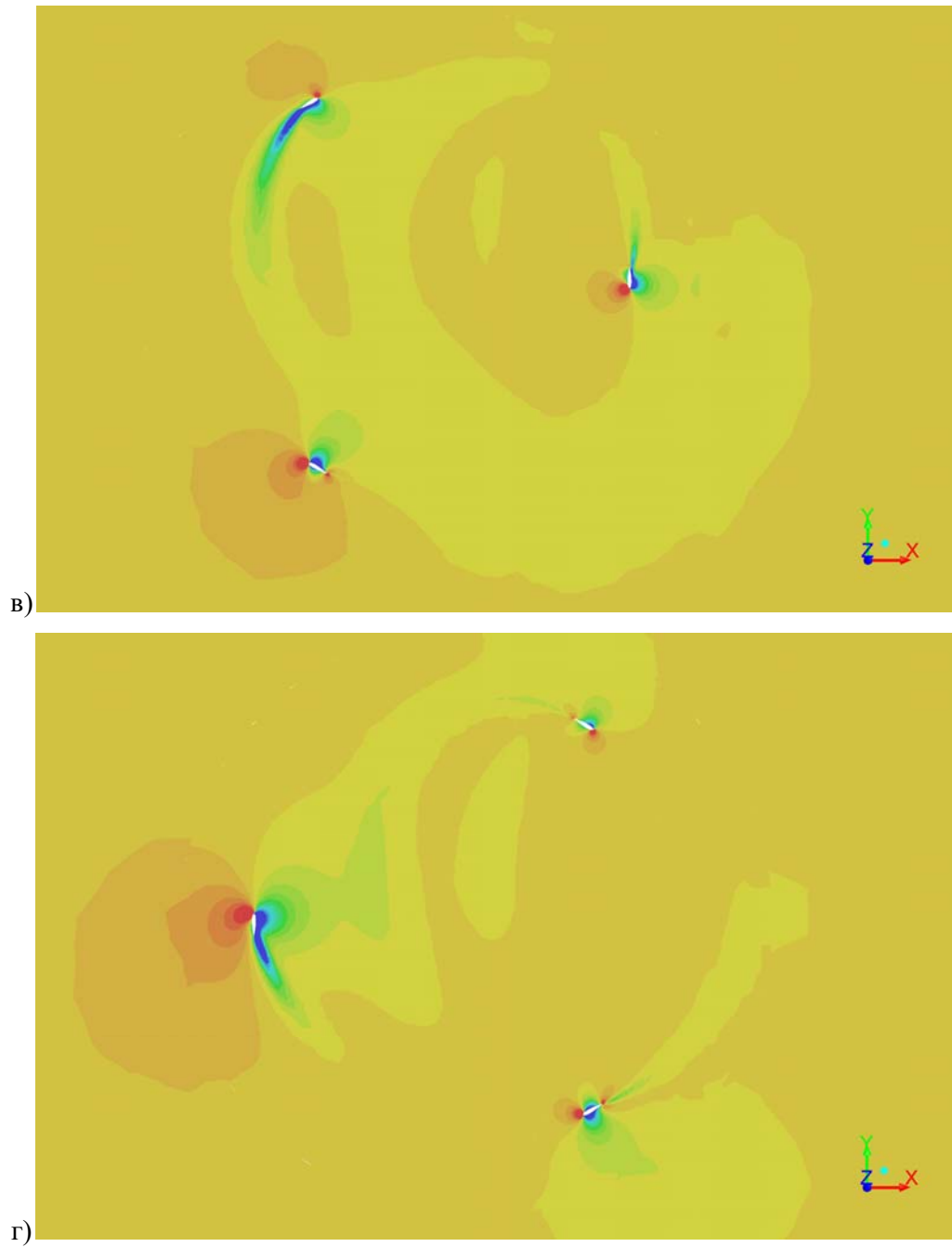
Слика 3.18. Расподела  $C_p$  по лопатици у три попречна пресека и шест угаоних положаја: а)  $\theta = -60^\circ$ , б)  $\theta = 0^\circ$ , в)  $\theta = 60^\circ$ , г)  $\theta = 120^\circ$ , д)  $\theta = 240^\circ$ , њ)  $\theta = 240^\circ$

Приказ контура притиска у средишњој попречној равни око лопатица,  $z/(L/2) = 0$ , у два различита временска тренутка који се разликују за угаони прираштај од  $30^\circ$  дат је на слици 3.19. Јасно је видљиво простирање поремећаја које постојање ротора уноси у униформно надолazeће струјно поље (услед дувања ветра). Слика 3.20 приказује исту ситуацију, али у различитој попречној равни смештеној у непосредној близини крајева лопатица где је  $z/(L/2) = 0.98$ . Опет, поређењем слика 3.19 и 3.20 уочава се да је, упркос тродимензионалности геометрије и постојања крајева лопатица на којима се јављају губици, расподеле притиска по дужини лопатице приближно константна чиме се оправдава

претпоставка равномерне расподеле оптерећења у каснијем структурном прорачуну. Највеће разлике у две поређене попречне равни дешавају се у аеродинамички неповољнијим угаоним положајима лопатице.



Слика 3.19. Контуре притиска око лопатица у различитим временским тренуцима и средишњој равни  $z/(L/2) = 0.00$

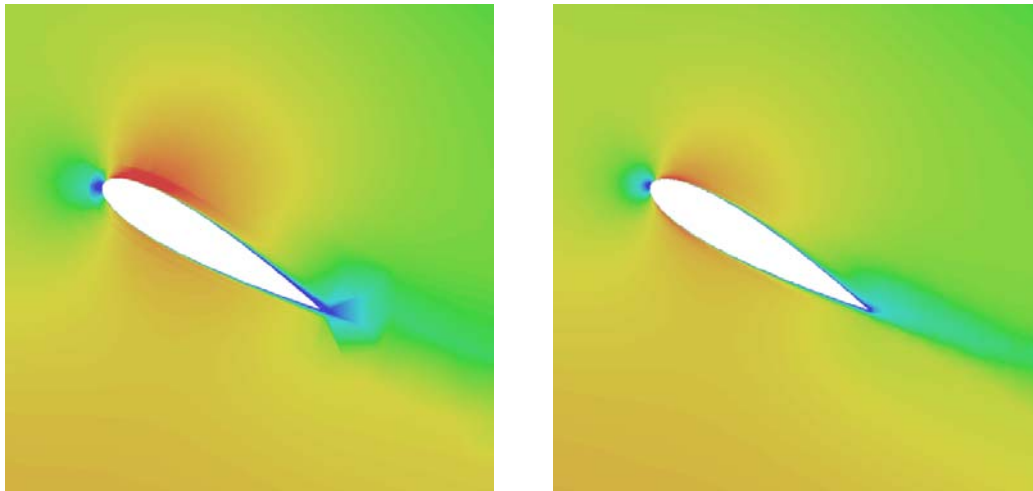
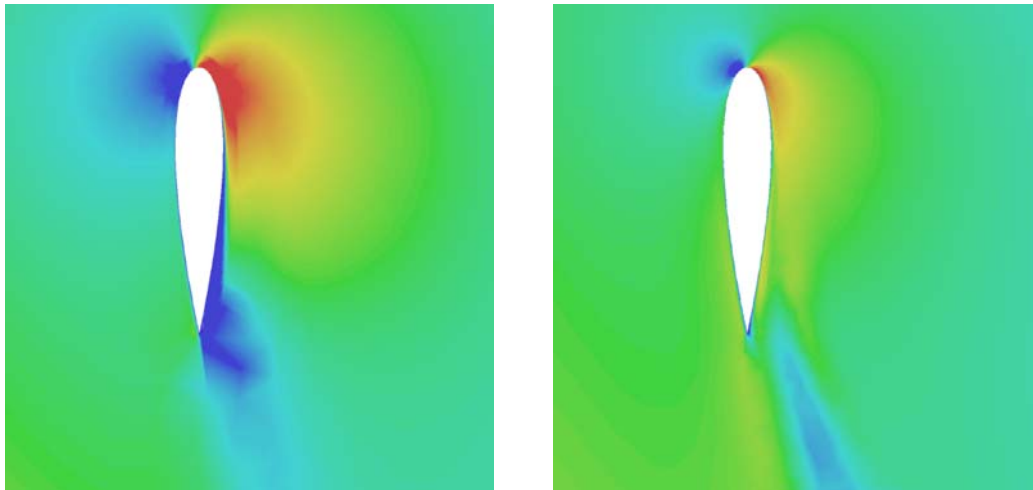


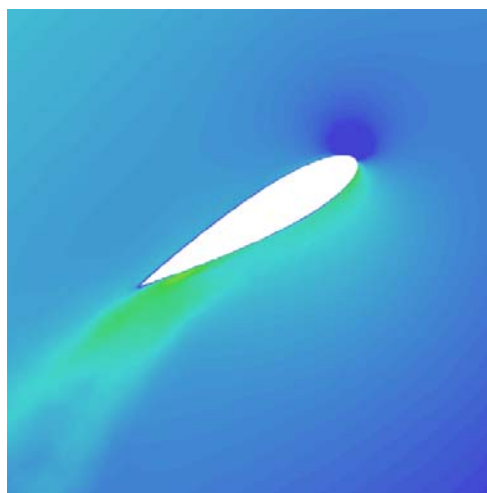
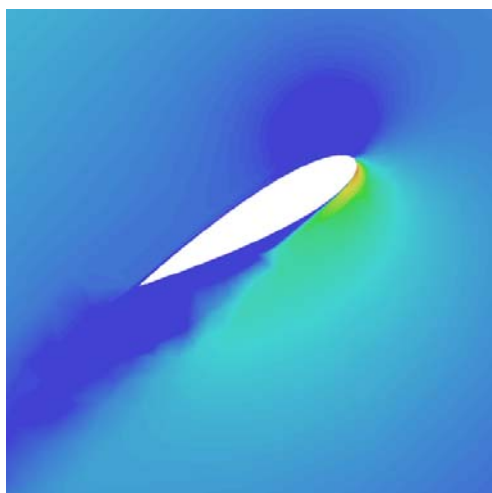
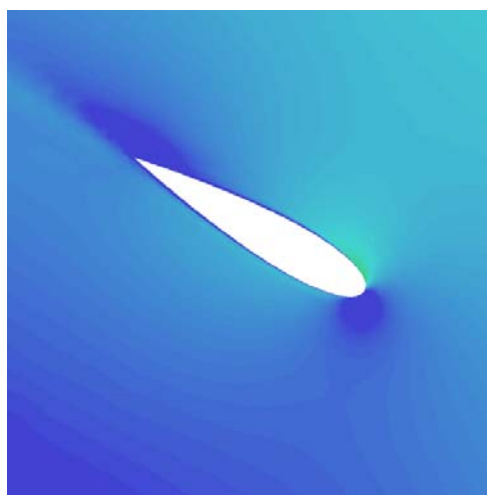
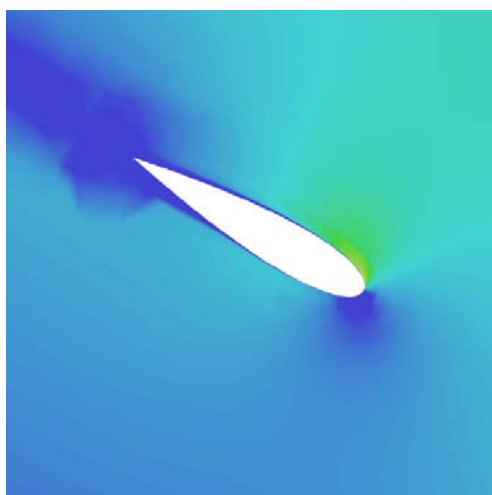
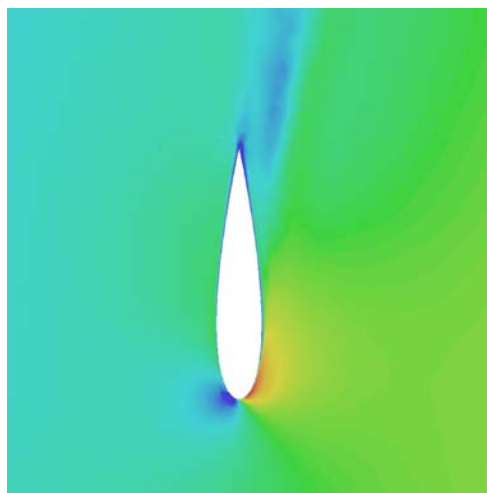
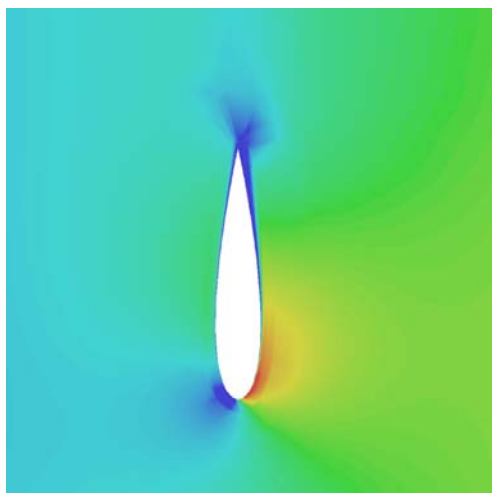
Слика 3.20. Контуре притиска око лопатица у различитим временским тренуцима и средишњој равни  $z/(L/2) = 0.98$

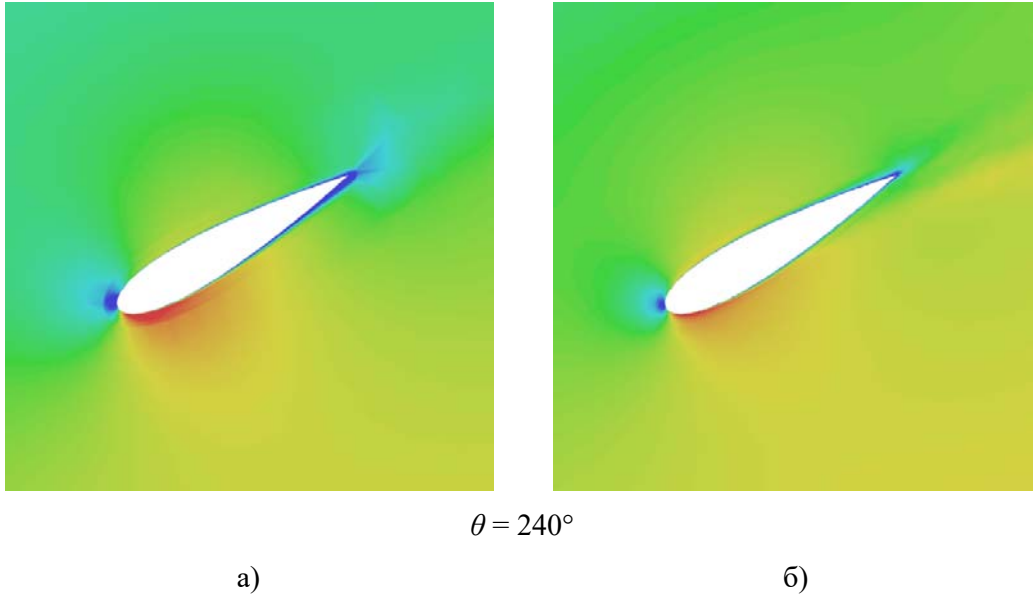
Слика 3.21 илуструје поље релативне (тоталне) брзине по две попречне равни ротора, средишњој и у непосредној близини краја лопатице, по целом



ротору. Иако је обимна компонента брзине доминантна, јасно су уочљиве различитости струјне слике у непосредној близини лопатица као и промена радних услова (нападних углова) са угаоним положајем лопатице. Лопатица пролази кроз аеродинамички најповољније услове у опсегу  $-90^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$ , док је у близини  $\theta \approx 90^\circ$  видљиво знатно одвајање струјања.

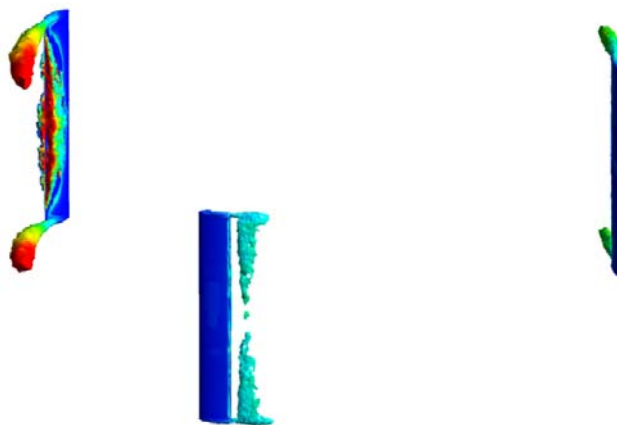
 $\theta = -60^\circ$  $\theta = 0^\circ$

 $\theta = 60^\circ$  $\theta = 120^\circ$  $\theta = 180^\circ$



Слика 3.21. Контуре релативне/тоталне брзине око лопатица у две попречне равни: а)  $z/(L/2) = 0.00$  и б)  $z/(L/2) = 0.98$

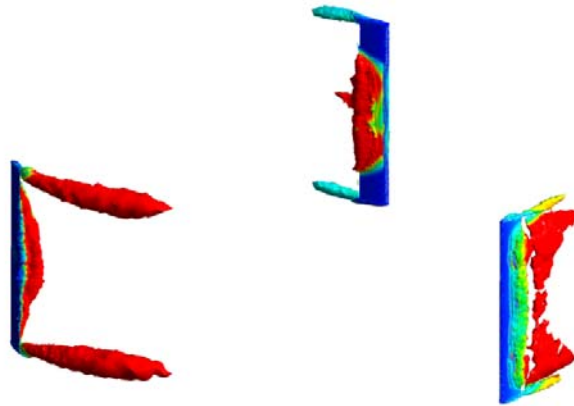
Просторно струјно поље око ротора ветротурбине могуће је илустровати и турбулентним структурама које се јављају као последица обртања, нестационарности, вртложности струјног тока и одвајања вртложног трага, слома узгона на лопатици и одвајања струјања, и сл. Слика 3.22 приказује струјно поље око ротора у оптималном радном режиму, а слика 3.23 при коефицијенту рада  $\lambda = 1.745$ . Веће турбулентне структуре црвене боје (јер су обојене према вредности локалне турбулентне вискозности) указују на већи отпор и губитке, односно смањење ефикасности ротора.





Слика 3.22. Вртложне структуре око ротора при  $\lambda = 2.856$





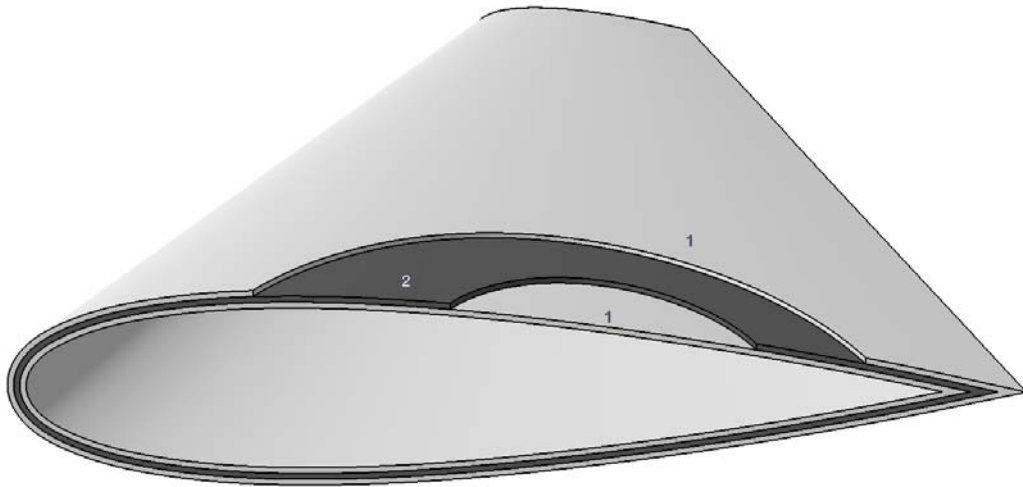
Слика 3.23. Вртложне структуре око ротора при  $\lambda = 1.745$

### 3.3 Прорачун структуре лопатице

У овом поглављу дат је приказ структурног модела лопатице, карактеристика композитних материјала који су одабрани, као и методе прорачуна (коначним елементима) и уведених претпоставки (љускаст модел лопатице) и ограничења.

#### 3.3.1 Структурни модел и материјали лопатице

Услед малих димензија и оптерећења, структурни модел лопатице упрошћен је тако да укључује само основне носеће елементе – спољашњу оплату. Композитна структура лопатице претпостављена је у облику симетричног ламината који се састоји из три ламине, приказане различитим бојама на слици 3.23, а које су поређане у следећем редоследу  $[(\theta_1)_{n1}/(\theta_2)_{n2}/(\theta_1)_{n1}]$  где су:  $\theta_1$  оријентација и  $n_1$  број платана спољашњег (белог) слоја, а  $\theta_2$  и  $n_2$  оријентација и број платана унутрашњег (сивог) слоја. Разматрана су две врсте стаклених платана: преимпрегнирана 80% платна унидирекционих стаклених влакана – UNIAХ и бидирекциона (уплетена под  $90^\circ$ ) – BIAХ која се данас много више користе при изради композитних делова [146].



Слика 3.24. Структурни модел лопатице без рамењаче

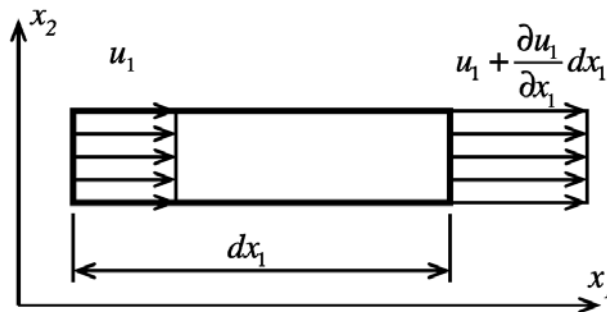
Табела 3.1. Карактеристике коришћених (разматраних) композитних материјала

Својство	Ознака	Јединица	Вредност	Вредност
			UNIAX	BIAX
Густина	$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	1.74	1.74
Модул еластичности	$E_1$	[GPa]	42.33	17.72
Модул еластичности	$E_2 = E_3$	[GPa]	9.72	17.72
Модул клизања	$G_{12} = G_{13}$	[GPa]	6.48	2.47
Модул клизања	$G_{23}$	[GPa]	4.35	2.47
Поасонов коефицијент	$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23}$	[-]	0.30	0.25
Критични напон на затезање	$F_{1t}$	[MPa]	710.16	310.00
Критични напон на притисак	$F_{1c}$	[MPa]	-343.36	-280.00
Критични напон на затезање	$F_{2t}$	[MPa]	15.86	310.00
Критични напон на притисак	$F_{2c}$	[MPa]	-15.86	-280.00
Критични напон на смицање	$F_6$	[MPa]	24.82	10.00
Дебљина једног слоја/платна	$dt$	[mm]	0.1	0.1

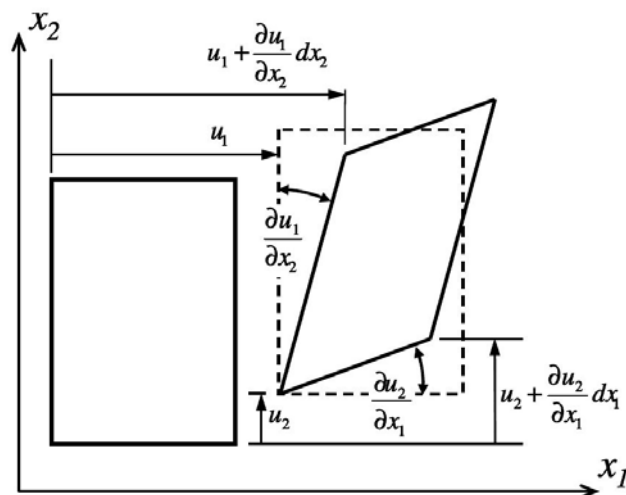
Основне механичке карактеристике оба типа платана приказане су у табели 3.1. У питању су ортотропни материјали који имају 3 управне равни симетрије и могуће их је описати преко 9 независних константи,  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{13}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{44}$ ,  $C_{55}$  и  $C_{66}$ . Како су и напон и деформација тензорске величине, Хуков закон се сада

може записати у матричном запису, израз (3.2). Нормалне компоненте тензора деформације,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$ , представљају релативне промене дужине по три основна правца и илустроване су на слици 3.24. Одговарајуће тангенцијалне компоненте,  $\gamma_4$ ,  $\gamma_5$  и  $\gamma_6$ , представљају промену (претходно право) угла разматраног делића приказану на слици 3.25.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} \quad (3.2)$$



Слика 3.25. Нормална компонента тензора деформације, преузето из [76]



Слика 3.26. Тангенцијална компонента тензора деформације, преузето из [76]



### 3.3.2 Коначноелементни модел и гранични услови

Сви структурни прорачуни изведени су методом коначних елемената у комерцијалном софтверском пакету ANSYS (Structural, Modal). МКЕ је апроксимативни, нумерички метод којим се промена непознате величине (овде померања) по елементу (односно, између његова два чвора) представља као сума (линеарна комбинација) реда одређене класе функција. Најчешће су у питању полиноми јер је њима лако манипулисати - сумирати, диференцирати, интегралити, итд. Полазне диференцијалне једначине морају бити задовољене у тачкама чворова мреже, па је одатле и могуће одредити непознате коефицијенте. Како је тачност прорачуна структуре методом коначних елемената веома задовољавајућа (у већини стандардних проблема могуће је остварити грешке мање од 1%), данас је веома заступљен како у научној, тако и у индустријској примени.

За тачност прорачуна веома је важно правилно поставити проблем што подразумева правилно дефинисање граничних услова: ограничења (померања чворова елемената) и оптерећења (сила, момената, притиска, убрзања, температуре и сл). Такође је важно направити/дефинисати довољно фину прорачунску мрежу, али и правилно одабрати тип елемента којим се описује геометрија (1Д, 2Д или 3Д) као и његове карактеристике.

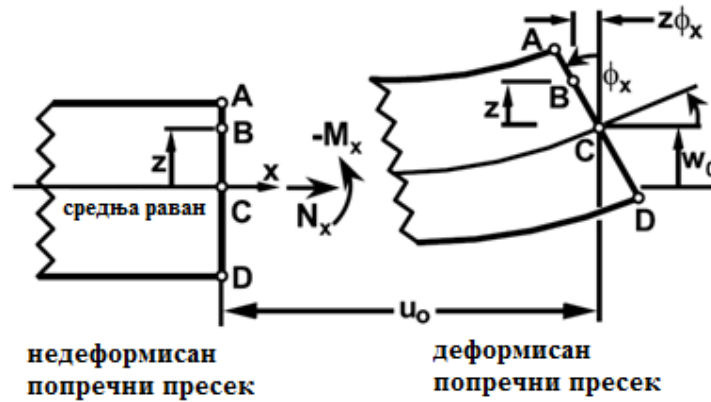
У случају љускастих композитних структура најефикасније је користити четвороугаоне плочасте елементе којима се дефинише дебљина и редослед ређања ламината. Најпопуларнија/најзаступљенија теорија којом је могуће решити деформације ламината (укључујући саставне ламине) је смицајна теорија 1. реда (FSDT – First-Order Shear Deformation Theory) која је заснована на следећим претпоставкама:

- линија дебљине ламината остаје равна и током деформације, иако јој је дозвољено да ротира,
- нема промене дебљине љуске током деформације,

и применљива је у случајевима када је однос најкраће ивице и дебљине љуске/ламината већи од 10. Илустрација уведених претпоставки и деформације љуске дата је на слици 3.26. У суштини, по поменутој теорији могуће је

израчунати померање произвољне тачке у лусци  $(u, v, w)$  у зависности од померања средишње тачке  $(u_0, v_0, w_0)$ , која припада средишњој линији, по изразу:

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= u_0(x, y) - z\phi_x(x, y), \\ v(x, y, z) &= v_0(x, y) - z\phi_y(x, y), \\ w(x, y, z) &= w_0(x, y). \end{aligned} \quad (3.3)$$



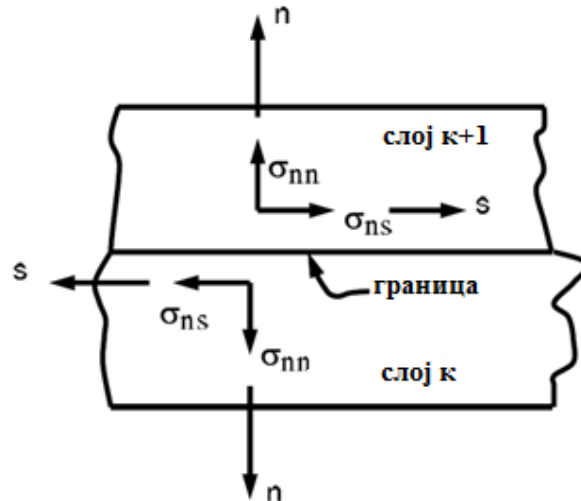
Слика 3.27. Претпостављена деформација танкозиде структуре по смицајној теорији 1. реда, преузето из [76]

Одговарајући запис преко шест компоненти тензора деформације је:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1(x, y, z) &= \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial \phi_x}{\partial x} = \varepsilon_1^0 + z\kappa_x, \\ \varepsilon_2(x, y, z) &= \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial \phi_y}{\partial y} = \varepsilon_2^0 + z\kappa_y, \\ \varepsilon_3(x, y, z) &= 0, \\ \gamma_4(x, y) &= -\phi_y(x, y) + \frac{\partial w_0}{\partial y}, \\ \gamma_5(x, y) &= -\phi_x(x, y) + \frac{\partial w_0}{\partial x}, \\ \gamma_6(x, y, z) &= \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - z \left( \frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \right) = \gamma_6^0 + z\kappa_{xy}. \end{aligned} \quad (3.4)$$

У танком слоју/мембрани значајне су три компоненте  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  и  $\gamma_6$  које описују деформацију баш у равни елемента. Код ламинатних структура, ова

теорија се примењује по сваком слоју/ламини, уз додатни услов континуалности између два узастопна слоја којим се захтева да напони и/или померања на заједничкој граници морају бити исти, слика 3.27.

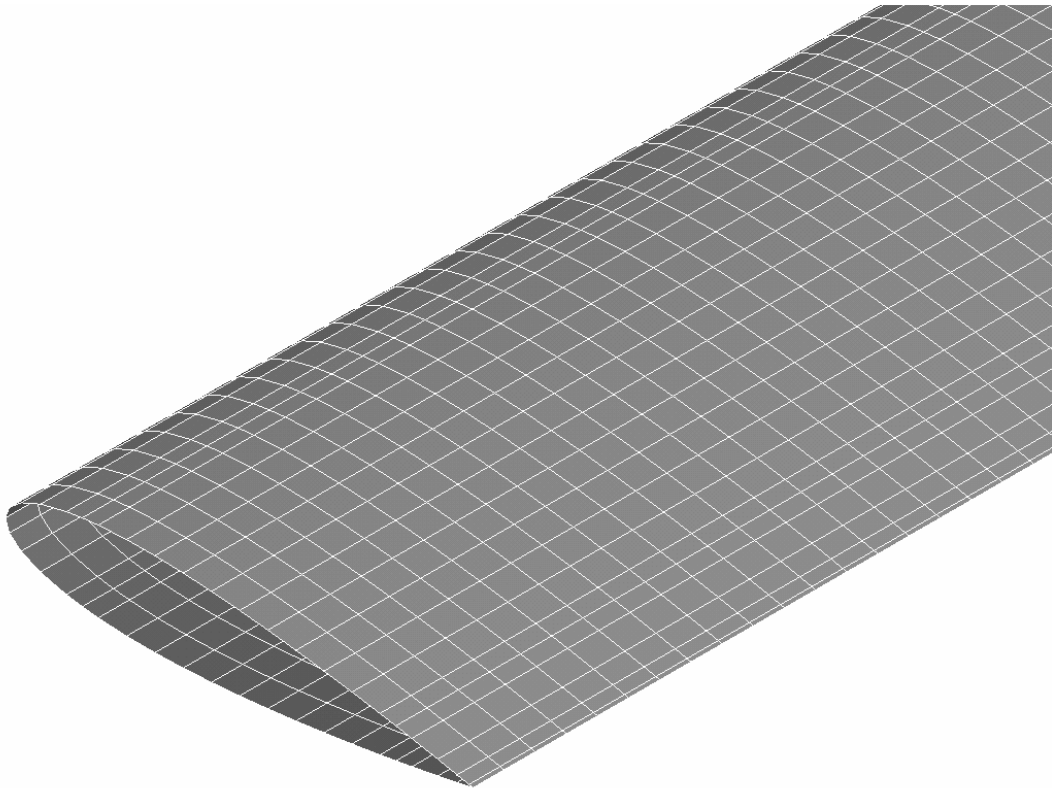


Слика 3.28. Услов континуалности између два слоја, преузето из [76]

Сви разматрани коначноелементни модели у спроведеним оптимизационим поступцима састоје се из 4400 елемената плочастог типа. Изабрани тип елемента, SHELL181, погодан је за разматрање танкозидих структура умерене дебљине, као и за разматрање ламинираних композита или сендвич-панела. Притом је могуће дефинисати максимално 250 слојева и спроводити и линеарне и нелинеарне анализе. Такође је погодан у случају већих деформација.

Пример генерисане прорачунске мреже/коначноелементног модела дат на слици 3.28. Густина мреже одабрана је тако да очува карактеристике /специфичности тестиране геометрије (на слици 3.28 је видљиво да су елементи у близини нападне и излазне ивице уситњени), али и тако да омогући што брже и тачније извршавање прорачуна (јер је потребно спровести велики број нумеричких анализа да би се дошло до оптималног решења). Оријентација сваког елемента одговара глобално усвојеном координатном систему, наиме  $x$ -оса одговара подужној оси лопатице,  $y$ -оса попречном (тангенцијалном) правцу, а  $z$ -оса висини (дебљини) лопатице. Сваком елементу придодељено је одређено

ређање ламината (константно по целој лопатици), па је укупна дебљина елемента (па и оплате лопатице) функција дефинисаног броја слојева.



Слика 3.29. Део коначноелементног модела без рамењаче

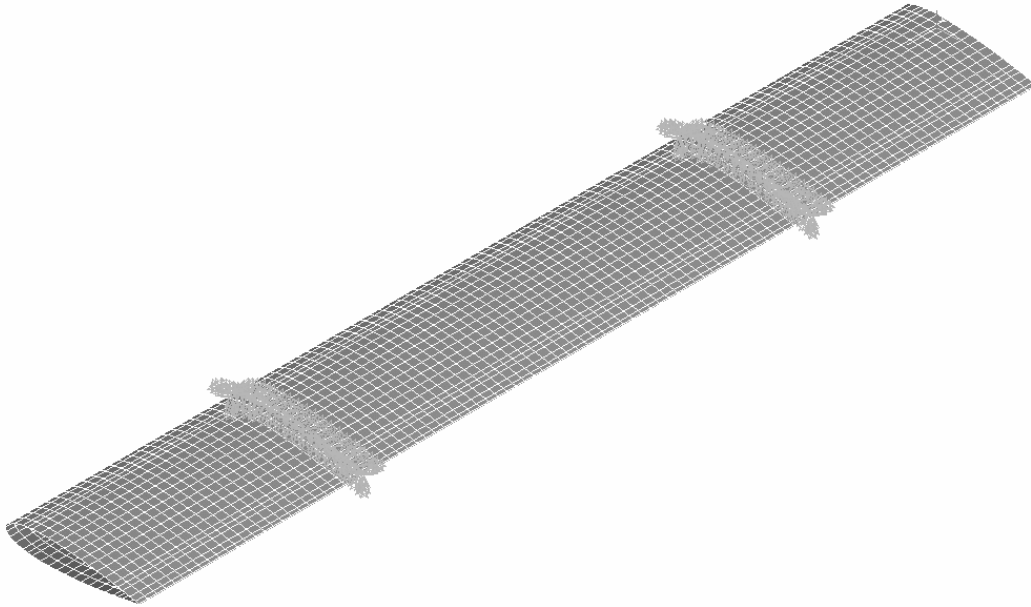
Опет, да би се што свеобухватније сагледао проблем и могућности оптимизације лопатице мале ветротурбине са вертикалном осом обртања, и да би се конструкција ротора што више упростила и појефтинила, разматрана су два различита случаја везивања лопатица:

1. лопатица је укљештена по средини (примењено у комбинацији са унидирекционим платнима) као мање вероватно, али и даље могуће техничко решење,
2. лопатица је укљештена по својој првој и трећој четвртини (примењено у комбинацији са бидирекционим стакленим платнима) као конвенционално решење што је приказано на слици 3.17.

Од оптерећења су уведена:

- максимална прорачуната аеродинамичка (при брзини ветра  $V_0 = 18 \text{ m/s}$ ),

- инерцијална (услед обртања угаоном брзином  $\omega$ , односно услед постојања нормалног убрзања интензитета  $\omega^2 R$ )
  - и гравитациона (масена) оптерећења
- помножена степеном сигурности 1.25 и униформно распоређена по лопатици.



Слика 3.30. Пример укљештене лопатице

Могући резултати прорачуна структуре структуре у програмском пакету Ansys укључују:

- укупну масу лопатице (зависи од броја слојева ламината),
- сопствене фреквенције и облике осциловања,
- померања лопатице при статичком оптерећењу,
- напоне,
- критеријум лома, итд.

Како се напони мењају по дебљини ламината, а критични напони зависе од оријентације влакана, изузетно корисна а ипак релативно једноставна глобална оцена поузданости танкозидих композитних структура је критеријум лома који је дефинисан на различите начине. Овде је, за процену поузданости и функционалности ламине лопатице, усвојен Цаи-Ву критеријум лома:

$$I_F = \frac{1}{R} = \left[ -\frac{B}{2A} + \sqrt{\left(\frac{B}{2A}\right)^2 + \frac{1}{A}} \right]^{-1} \quad (3.5)$$

$$A = \frac{\sigma_1^2}{F_{1t}F_{1c}} + \frac{\sigma_2^2}{F_{2t}F_{2c}} + \frac{\sigma_4^2}{F_{3t}F_{3c}} + \frac{\sigma_4^2}{F_4^2} + \frac{\sigma_5^2}{F_5^2} + \frac{\sigma_6^2}{F_6^2} + c_4 \frac{\sigma_2\sigma_3}{\sqrt{F_{2t}F_{2c}F_{3t}F_{3c}}} \\ + c_5 \frac{\sigma_1\sigma_3}{\sqrt{F_{1t}F_{1c}F_{3t}F_{3c}}} + c_5 \frac{\sigma_2\sigma_1}{\sqrt{F_{1t}F_{1c}F_{2t}F_{2c}}} \quad (3.6)$$

$$B = (F_{1t}^{-1} - F_{1c}^{-1})\sigma_1 + (F_{2t}^{-1} - F_{2c}^{-1})\sigma_2 + (F_{3t}^{-1} - F_{3c}^{-1})\sigma_3 \quad (3.7)$$

који треба да буде мањи од 1 по целој структури.

## Глава 4

### Оптимизација структуре лопатице

Инжењерски проблеми данашњице постају све сложенији и неретко њихово решење представља компромис. Велики број критеријума који су међусобно у супротности потребно је испоштовати и то захтева интеракцију неколико научних дисциплина. Нумеричке мултидисциплинарне и вишециљне оптимизације полако постају стандард у процесима пројектовања, развоја и производње композитних структура јер омогућавају смањење експерименталних и развојних испитивања која су у случају композитних лопатица ветротурбина често изузетно скупа.

Резултати спроведеног аеродинамичког прорачуна опструјавања фиксираног спољашњег облика лопатице (пре свега аеродинамичких сила које делују на лопатицу) и развијени параметризовани, структурни модел лопатице и метод прорачуна, искоришћени су у наставку за оптимизацију дефинисаних параметара структуре лопатице (броја  $n_i$  и оријентације  $\theta_i$  слојева ламинатне структуре композитне лопатице). Као метод оптимизације изабрана је оптимизација ројем честица. За спровођење целог поступка развијен је сопствени код који је детаљно описан у овој глави.

#### 4.1 Оптимизација ројем честица

Изабран је хеуристични, недетерминистички, модерни модел оптимизације базиран на понашању великог броја честица/јединки у групи/роју које су у потрази за храном. Оригинално су га дефинисали Еберхарт и Кенеди [135]. Имитира функционисање добро организованих социјалних организама као што су ројеви пчела, мравна, термита или јата птица или риба. Јединкама је допуштено да

се слободно крећу по простору променљивих тако што им се у сваком итеративном кораку рачуна брзина која зависи и од појединачног (когнитивног) и групног, социјалног (колективног) успеха. На тај начин у обзир се узимају и интелигенција и достигнућа јединке, али и групе као једне целине. Уколико одређена честица открије храну (оптималну вредност функције) и остатак роја ће од следеће итерације кренути за њом.

Генерални ток прорачуна/оптимизационог поступка функције  $f(\mathbf{X})$  где је  $\mathbf{X}$  вектор независних улазних променљивих:

1. Дефинисање граница домена сваке улазне променљиве  $x_i$  (које могу бити континуалне или дискретне).
2. Претпоставка величине роја, односно броја честица  $M$  (веома важна одлука; величина мора бити довољно велика да обезбеди шароликост решења, а опет и довољно мала да би се прорачун извршио у реалном времену; углавном се претпоставља  $20 \leq M \leq 30$  док генерално, вишекритеријумске оптимизације са већим бројем улазних променљивих захтевају већи број честица у роју па  $50 \leq M \leq 100$ ).
3. Потпуно случајно формирање прве популације (роја честица):  $\mathbf{X}_1^{(0)}, \mathbf{X}_2^{(0)}, \dots, \mathbf{X}_M^{(0)}$ .
4. Потпуно случајно почетно формирање вектора брзина честица:  $\mathbf{V}_1^{(0)}, \mathbf{V}_2^{(0)}, \dots, \mathbf{V}_M^{(0)}$ .
5. Одређивање вредности функције која се оптимизује сваке честице:  $f(\mathbf{X}_1), f(\mathbf{X}_2), \dots, f(\mathbf{X}_M)$ .
6. Прорачун нових вектора брзина  $\mathbf{V}_j^{(i)}$  (у следећој итерацији  $i$ ) на основу претходних вредности вектора брзина и положаја, случајних коефицијената као и глобалног и локалног оптимума, израз (4.1) или (4.3).
7. Прорачун нових вектора положаја честица  $\mathbf{X}_j^{(i)}$ , израз (4.2).
8. Одређивање нових вредности функције  $f(\mathbf{X}_j^{(i)})$ .
9. Понављање корака 6-8 до постизања конвергенције, проналаска оптимума, истека максималног броја итерација и сл.
10. Анализа оптималног (или оптималних) решења.



Случајни тежински фактори,  $r_1$  и  $r_2$ , којима су помножени брзински сабирци сваке честице, израз (4.1), обезбеђују да се алгоритам не „заглави” у локалном екстремуму:

$$\mathbf{V}_j^i = \omega \mathbf{V}_j^{i-1} + c_1 r_1 (\mathbf{X}_j^{local} - \mathbf{X}_j^{i-1}) + c_2 r_2 (\mathbf{X}_j^{global} - \mathbf{X}_j^{i-1}), \quad (4.1)$$

док су константе  $\omega$ ,  $c_1$  и  $c_2$  задате на почетку процедуре и могу се мењати од зависности од проблема који се разматра. Уобичајене вредности су  $\omega \approx 0.6$ ,  $c_1 \approx 2.0$  и  $c_2 \approx 2.0$ .

Нови положај сваке јединке рачуна се из претходног и тренутне брзине честице, израз (4.2).

$$\mathbf{X}_j^i = \mathbf{X}_j^{i-1} + \mathbf{V}_j^i. \quad (4.2)$$

Додатна мера сигурности конвергенције поступка је увођење мале могућности да честица „полуди”. С времена на време, честица ће одбацити сопствена и групна сазнања и биће јој придодељени потпуно нови, случајно задати вектори положаја и брзине (односно, биће јој дозвољено да истражује потпуно нове делове простора променљивих). Уобичајена вредност „вероватноће лудости” је мала, око 1%.

У случају спровођења вишекритеријумске оптимизације, описани метод потребно је мало прилагодити (модификовати). Пре свега, оптимално решење више није јединствено, већ начелно постоји читав скуп оптималних решења. Из тог разлога, тренутни глобални оптимум  $\mathbf{X}_j^{global}$  коме теже све честице роја током једне итерације прорачуна треба случајно изабрати из скупа оптималних решења на почетку те итерације. Даље, уколико су дефинисана одређена ограничења, да би се додатно обезбедила конвергенција оптимизационог поступка ка скупу оптималних решења и очувала разноврсност решења, израз за брзину је мало модификован (додат је члан којим се очувава диверзитет роја):

$$\mathbf{V}_j^i = \omega \mathbf{V}_j^{i-1} + c_1 r_1 (\mathbf{X}_j^{local} - \mathbf{X}_j^{i-1}) + c_2 r_2 (\mathbf{X}_j^{global} - \mathbf{X}_j^{i-1}) + c_3 r_3 (\mathbf{X}_j^{i-1} - \mathbf{X}_j^{global}). \quad (4.3)$$

Такође, у случају ограничене вишециљне оптимизације, потребно је увести доследан начин поређења две честице (како су излази многоструки уобичајене релације мање < или веће >, у зависности да ли се тражи минимум или максимум функције, више нису адекватне). Овде је то изведено дефинисањем релације ограничене доминације једне честице над другом [137]. Наиме, свакој честици се

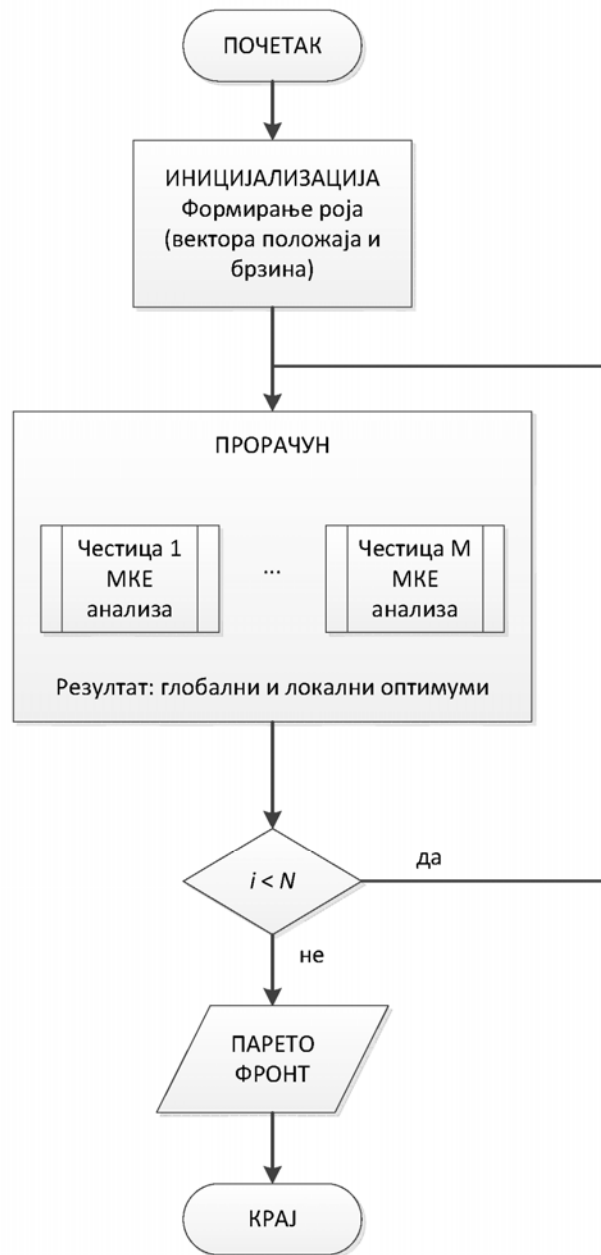
поред излазних параметара додељује и број којим је квантификовано њено глобално кршење свих наметнутих ограничења (најчешће као сума појединачних). Честица се може сматрати „задовољавајућом” само ако не крши ниједно ограничење. При поређењу две честице прво се проверава да ли су обе „задовољавајуће”, а тек после која је доминантна (доминантна честица је боља по свим критеријумима). Уколико ниједна није „задовољавајућа”, оптимално решење је оно чије је кршење ограничења најмање. Ова релација/правило користи се при одређивању глобалних, али и локалних оптимума.

## 4.2 Алгоритам прорачуна и софтверска имплементација

Претходно описани оптимизациони поступак прилагођен је проблематици проналаска оптималне унутрашње структуре лопатице. Глобални ток алгоритма илустрован је на слици 4.1. Свака јединка одређена је са четири независне улазне променљиве, које се могу записати вектором  $\mathbf{X} = [n_1 \ \theta_1 \ n_2 \ \theta_2]$  и описују шему ређања ламината. Вредности  $n_1$  и  $\theta_1$  односе се на прву и трећу, а  $n_2$  и  $\theta_2$  на другу ламину. Како је претпостављена дебљина сваког платна  $dt = 0.1 \text{ mm}$ , резултујућа укупна дебљина композитне лопатице је  $t = (2n_1 + n_2)dt$ . Минимална дебљина слојева је 3 што се види и из табеле 4.1 која приказује границе простора дискретних променљивих, као и њихове могуће промене. На почетку оптимизационог поступка, свакој честици је случајно одређен почетни положај и вектор брзине, након чега започиње итеративна прорачунска петља у којој се свакој честици одређују вредности укупне масе, померања краја лопатице, критеријума лома, сопствених фреквенција итд.

Табела 4.1. Простор дискретних променљивих

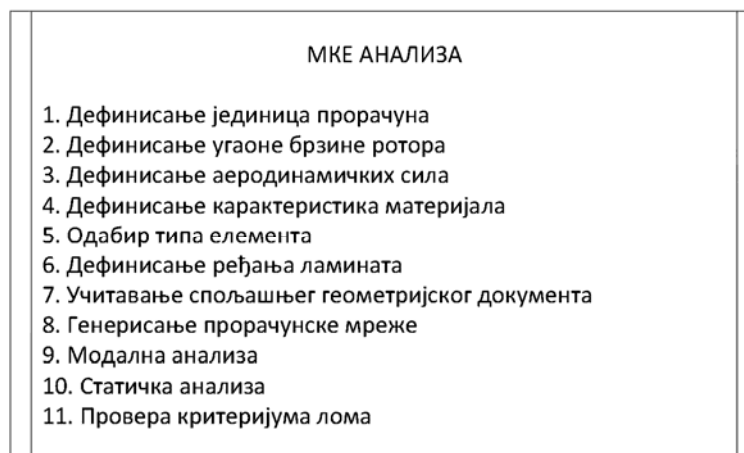
Променљива	Јединица	Минимум	Максимум	Корак/Прираштај
$n_i$	[–]	1	15 (20)	1
$\theta_i$	[°]	0	90	15



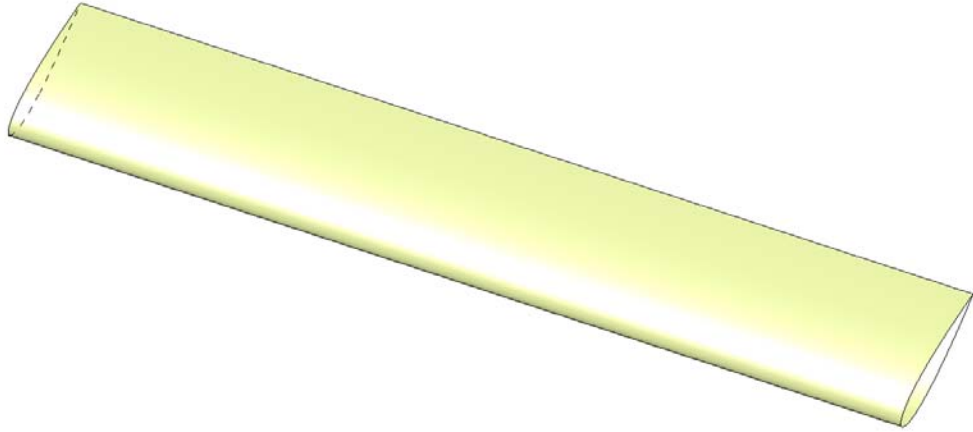
Слика 4.1. Глобални ток алгоритма оптимизације

Поједначани прорачун (МКЕ анализа) сваке честице, који је вишеструко поновљан у свакој итерацији оптимизационог поступка, а подразумевао је и статичку и модалну анализу, рашчлањен је на подфазе набројане на слици 4.2. Коришћене су стандардне SI јединице, док угаона брзина ротора има константну вредност од  $\Omega = 200 \text{ obrt/min} = 20.944 \text{ rad/s}$  током читавог поступка (па тиме и

обимну брзину од  $V_T = \Omega R = 31.416 \text{ m/s}$ ). Од аеродинамичких сила примењене су највеће тренутне вредности нормалне  $F_N$  и тангенцијалне  $F_T$  силе прорачунате при непоремећеној брзини ветра од  $V_0 = 18 \text{ m/s}$ , слике 3.13 и 3.14. Интензитет уведених гравитационих ( $mg$ ) и инерцијалних (центрифугалних,  $mR\Omega^2$ ) оптерећења зависи од масе лопатице  $m$  и посебно се рачуна за сваку честицу. Коришћена су унидирекциона (UNIAX) или бидирекциона (BIAX) платна чије су механичке карактеристике дате у табели 3.1. Тип коначног елемента је четвороугаони плочасти елемент са 6 степени слободе ( $u_x, u_y, u_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ ). Ређање ламината, као последица улазних променљивих [ $n_1 \theta_1 n_2 \theta_2$ ] које и треба оптимизовати, такође се разликује за сваку јединку. Са друге стране, како све разматране честице имају исту спољашњу геометрију, створен је један полазни САД документ (фајл) који садржи танку тродимензионалну љуску (састављену из горњаке и доњаке) и представља упрошћени модел лопатице, слика 4.3. Учитава се пре спровођења самих прорачуна, и користи за генерисање коначноелементног модела – прорачунске мреже која је иста за све честице, а чији је детаљ приказан на слици 3.28. Модална анализа (слободних осцилација стационарне структуре) спроводи се над само укљештеном лопатицом, а као резултат бележе се вредности сопствених фреквенција. Потом се спроводи статичка структурална анализа укљештене лопатице и оптерећене силама које делују дуж три основна правца (нормалне аеродинамичке и центрифугалне силе дуж нормалног, тангенцијалне аеродинамичке силе дуж тангенцијалног и масене силе дуж вертикалног правца). Као резултат бележе се максимална померања и критеријум лома структуре.



Слика 4.2. Шема појединачног прорачуна сваке честице



Слика 4.3. Полазни геометријски модел лопатице

Величина роја углавном је износила  $M = 80$  или  $M = 100$ , док је број прорачунских корака (итерација) био  $N = 20$  за двоциљну, и  $N = 25$  за трокритеријумску оптимизацију. Све усвојене вредности константи и фактора значајних за оптимизацију излистане су у табели 4.2.

Табела 4.2. Изабране вредности константи поступка оптимизације ројем честица

Параметар	Ознака	Вредност
Фактор инерције	$\omega$	0.6
Когнитивни фактор	$c_1$	2.0
Социјални фактор	$c_2$	2.0
Фактор очувања диверзитета	$c_3$	2.0
Вероватноћа лудости	$P_{st}$	0.01
Величина роја	$M$	80, 100
Број итерација	$N$	20, 25

Као што је већ напоменуто, за сваку разматрану честицу, односно вредности њених улазних параметара, вршени су прорачуни структуре при статичком оптерећењу (које одговара максималној дозвољеној брзини ветра  $V_0$ ) и (динамичких) модалних карактеристика лопатице методом коначних елемената у

комерцијалном софтверском пакету ANSYS. Само неки од излазних параметара које је било могуће добити укључују: масу лопатице  $m$ , максимално померање структуре (краја) лопатице  $u_{tip}$ , првих пет сопствених фреквенција лопатице  $\nu_i$ ,  $i \in [1, 5]$ , и максималну вредност Цаи-Ву критеријума лома по лопатици  $I_F$ . Наравно, у зависности од крајњих циљева и сврхе оптимизације, који најчешће подразумевају:

- смањење цене, утрошеног материјала и масе лопатице,
- повећање радне способности и поузданости конструкције,
- једноставност израде и одржавања,

могуће је:

- увести другачију претпоставку о шеми ређања или материјалу ламината,
- разматрати више различитих радних режима (при различитим брзинама ветра или угаоним брзинама ротора при његовом покретању или заустављању или критичне радне услове при налетима ветра када је ветротурбина заустављена итд),
- разматрати циклична (нестационарна) оптерећења која одговарају реалним радним условима,
- увести ограничења у смислу масе или крутости лопатице, и сл.

### 4.3 Изведене оптимизације

Сprovedено је неколико различитих ограничених оптимизационих поступака (2- и 3-критеријумских) који су описани у наставку. Основна предност вишециљне у односу на једнокритеријумску оптимизацију је могућност разматрања више опречних критеријума (аспеката, особина, карактеристика, понашања структуре) истовремено, чиме се повећава шанса конструисања заиста побољшаног решења/дизајна (прилагођеног специфичним радним условима). Често, разматрање једне циљне функције не пружа потпуни увид у физикалност проблема и/или резултује решењем које је оптимизовано по једном критеријуму али може бити изразито неповољно по другим, такође значајним критеријумима. Увођењем више функција циља могуће је донекле превазићи та ограничења, али треба бити опрезан при избору броја и типа циљних функција, односно о

правилној поставци проблема. (Уколико су критеријуми спрегнути или уведена ограничења престога неће бити могуће наћи оптимално решење. Са друге стране, уколико су критеријуми превише разнородни и опречни, и скуп оптималних решења који се добије биће расут што значајно отежава извођење било каквих валидних закључака.)

#### 4.3.1 Двокритеријумска оптимизација

Овде је разматрано истовремено задовољење минималне масе  $\min(m)$  и минималног померања краја лопатице  $\min(u_{\text{tip}})$  при остварењу задовољавајућих максималних вредности критеријума лома (Цаи-Бу) по целој лопатици као и довољној разлици првих пет сопствених фреквенција  $v_i$  и целобројних умножака номиналне фреквенције обртања ротора ветротурбине  $n v_{\text{nom}}$ :

$$\min(m) \wedge \min(u_{\text{tip}})$$

под условом:

$$I_F \leq 1,$$

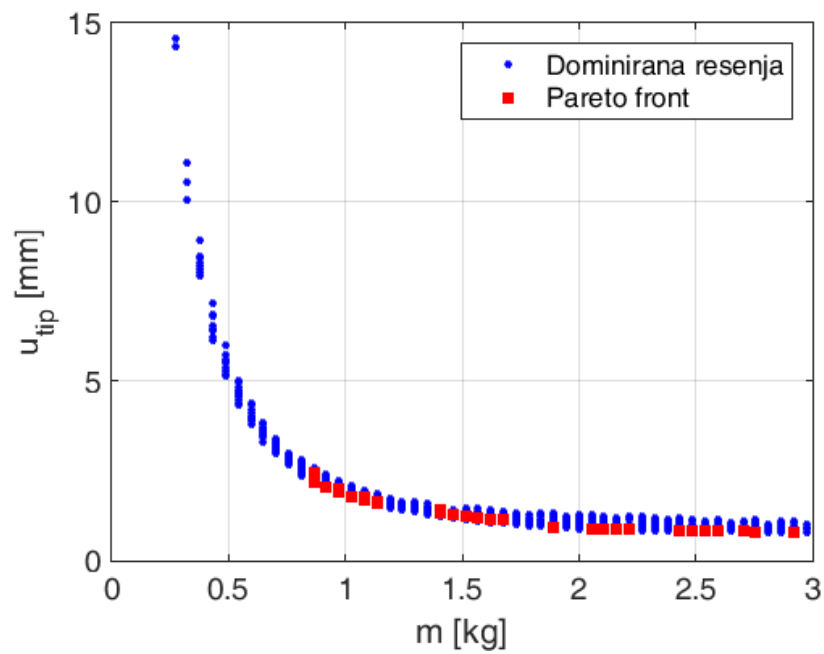
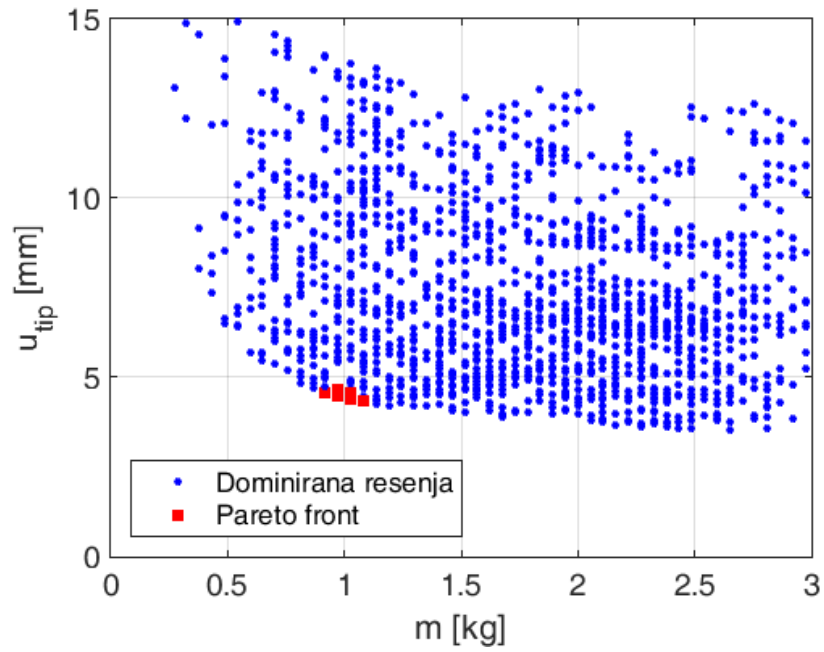
$$|n v_{\text{nom}} - v_i| \geq 0.5 \text{ Hz}, i \in [1, 5], n \in [1, 3].$$

Број честица у роју био је  $M = 80$  или  $M = 100$ , док је број изведених прорачунских корака износио  $N = 20$  (+ почетни корак).

Вршени су различити оптимизациони поступци:

- оптимизација 1, коришћена унидирекциона платна, лопатица укљештена по средини, за димензионисање коришћене осредњене вредности аеродинамичке силе,
- оптимизација 2, коришћена бидирекциона платна, лопатица укљештена по првој и трећој четвртини, за димензионисање коришћене максималне вредности аеродинамичке силе.

Добијени Парето фронтови приказани су на слици 4.4 црвеним квадратићима, док плави кружићи одговарају вредностима излазних параметара свих разматраних (неоптималних) честица.



Слика 4.4. Прорачунати 2Д Парето фронтони за претпостављени модел лопатице:

а) оптимизација 1, б) оптимизација 2

Поређењем слика 4.4а и 4.4б лепо се види утицај начињених избора. Наиме, само једно укљештење по средини лопатице (иако су примењене нешто



ниже аеродинамичке силе) проузрокује значајно већа померања на крајевима. Такође, применом унидирекционих платана (што је данас много ређе код комерцијалних производа) добија се много шири спектар понашања структура. Интересантно је да је укупан број примењених слојева сличан у оба примера, 17 у односу на 16, што се огледа и по сличној вредности масе  $m \approx 0.9$  kg.

Делови добијених Парето скупова оптималних решења који се односе на најлакше лопатице излистани су у табелама 4.3 и 4.4 за оптимизације 1 и 2 редом. Из табеле 4.3 која се односи на унидирекциона платна може се закључити да је спољашња ламина мале дебљине и углавном оријентисана под углом  $\theta_1 = 90^\circ$  или  $\theta_1 = 75^\circ$  док је унутрашња ламина, као основни носећи елемент, веће дебљине и искључиво оријентисана под  $\theta_2 = 0^\circ$ . Као најинтересантија честица из скупа оптималних честица добијеног оптимизацијом 1 изабрана је честица 1 описана вектором  $\mathbf{X}_1 = [1 \ 90 \ 15 \ 0]$ .

Табела 4.3. Део Парето фронта добијеног оптимизационим поступком 1

$n_1$	$\theta_1$ [°]	$n_2$	$\theta_2$ [°]	$m$ [kg]	$u_{\text{вр}}$ [mm]	$n = 2n_1 + n_2$
1	90	15	0	0.9191	4.584	17
2	75	14	0	0.9731	4.647	18
2	90	14	0	0.9731	4.647	18
1	90	16	0	0.9731	4.488	18
2	75	15	0	1.027	4.553	19
1	90	17	0	1.027	4.405	19
1	90	18	0	1.081	4.332	20

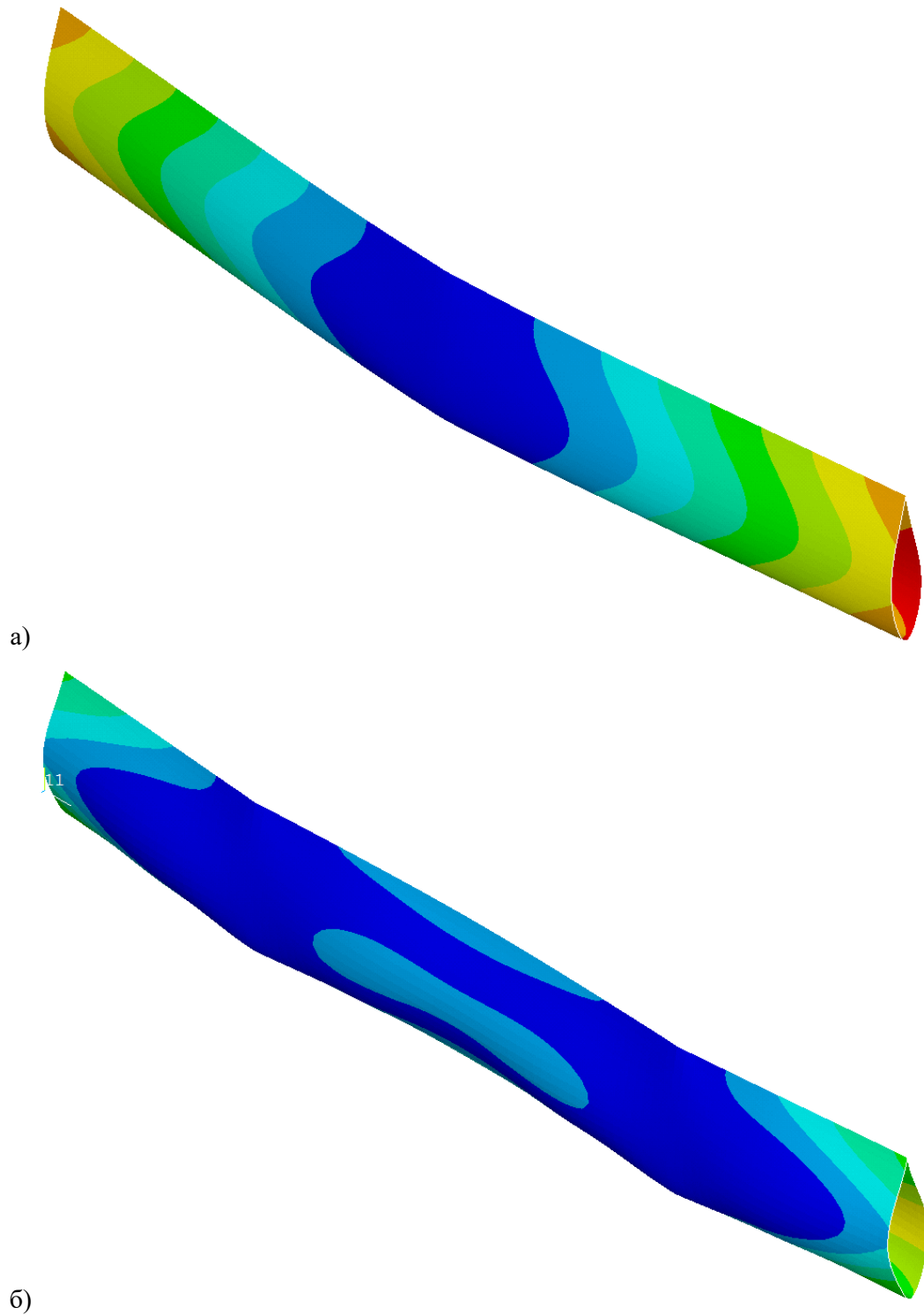
Нешто различити резултати добијени су уколико се користе бидирекциона платна, табела 4.4. Иако је број слојева сличан, на први поглед делује да су оријентације много разнородније и да узимају све могуће вредности из скупа  $[0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ]$ . Међутим, како су у питању уплетена платна која имају исте механичке карактеристике у два главна, управна правца, еквивалентне глобалне карактеристике ламината примарно не зависе од оријентације слојева платна, већ од броја слојева, што се и види по веома компримованом скупу разматраних честица приказаном на слици 4.4б. Односно, може се сматрати да је

најважнији резултат оптимизације 2 укупни број слојева ламината. Такође, употребом платана постављеним под  $0^\circ$  добијају се нешто круће структуре. Као најинтересантнија за даље поређење изабрана је честица 2 представљена вектором улазних променљивих  $\mathbf{X}_2 = [5 \ 0 \ 6 \ 45]$ .

Табела 4.4. Део Парето фронта добијеног оптимизационим поступком 2

$n_1$	$\theta_1 [^\circ]$	$n_2$	$\theta_2 [^\circ]$	$m$ [kg]	$u_{tip}$ [mm]	$n = 2n_1 + n_2$
4	75	8	75	0.865	2.467	16
5	15	6	75	0.865	2.269	16
4	75	8	30	0.865	2.231	16
5	0	6	45	0.865	2.189	16
5	75	7	30	0.9191	2.068	17
8	0	2	60	0.9731	1.984	18
5	0	8	30	0.9731	1.919	18
5	75	9	30	1.027	1.794	19
5	15	9	60	1.027	1.790	19
7	30	6	75	1.081	1.772	20
6	75	8	45	1.081	1.741	20
5	0	10	30	1.081	1.693	20

Ради илустрације различитог понашања структуре, прорачуната померања лопатица 1 и 2 при статичком оптерећењу упоређена су на слици 4.5. Плаве зоне одговарају нултој вредности, а црвене максималном померању које износи приближно 5 mm. У структурном смислу, јасни су доприноси и предности два укљештења у односу на једно по средини. Са друге стране, двострука веза са централним вратилом мало ће отежати читаву структуру и повећати аеродинамички отпор (услед постојања додатних елемената). Решење које се такође примењује у пракси подразумева везивање крајева лопатица за вратило, чиме се обезбеђује довољно крута структура, а могуће је остварити и извесно смањење аеродинамичких губитака на крајевима лопатица.



Слика 4.5. Померања одабраних оптималних модела добијених 2Д  
оптимизационим поступком: а) 1 и б) 2

## 4.3.2 Трокритеријумска оптимизација

Поред до сада разматраних циљних функција минималне масе и минималног померања, могуће је оптимизациони поступак обогатити/усложнити увођењем додатне циљне функције – максималне разлике сопствених и умножака фреквенције обртања  $\Delta\nu$ . Тада се једино наметнуто ограничење структурне природе односи на критеријум лома по лопатици:

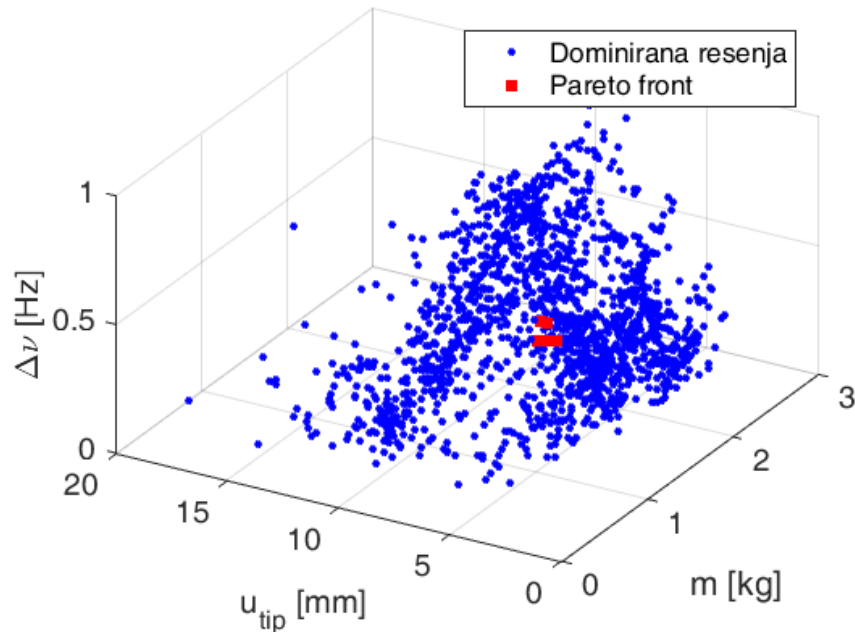
$$\min(m) \wedge \min(u_{\text{tip}}) \wedge \max(|n\nu_{\text{nom}} - \nu_i|)$$

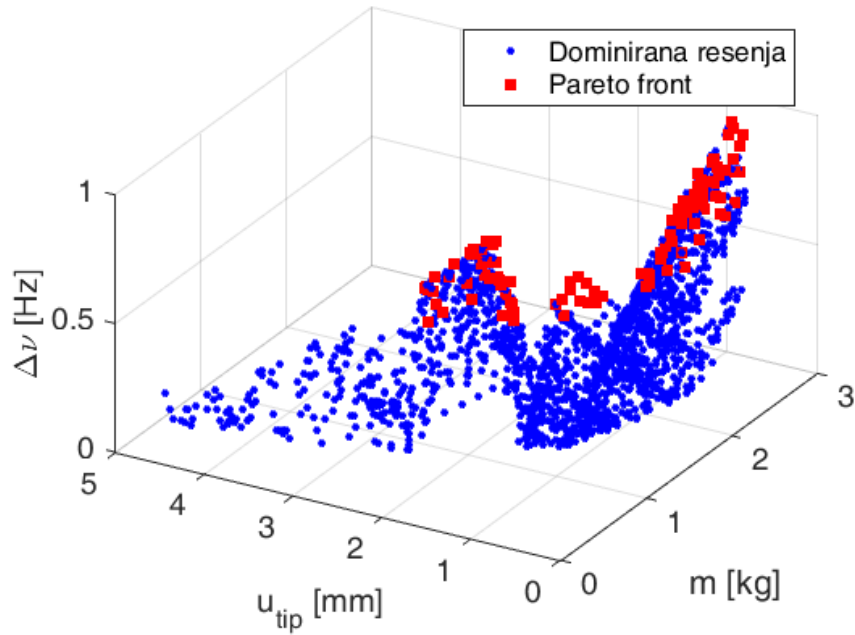
под условом:

$$I_F \leq 1.$$

Опет, могуће је спровести различите оптимизационе поступке па су овде опет тестирана и унироекциона и бидирекциона влакна, као и два типа укљештења.

Резултати, у форми графика – приказа Парето скупа дати су на слици 4.6. Сада су Парето фронтови облика закривљених површи у тродимензионалном простору излазних величина.





б)

Слика 4.6. Прорачунати 3Д Парето фронтони трокритеријумских оптимизација: а) 1 и б) 2

Како је трокритеријумски оптимизациони поступак 1 нашао веома слична решења као и одговарајући двокритеријумски (углавном нулта оријентација, минимални број слојева 17), оптимална решења нису посебно излистана. Део скупа оптималних решења пронађених трокритеријумском оптимизацијом 2 приказан је у табели 4.5. Опет су излистана решења поређана у растућем поретку по укупној маси лопатице, а максимални број слојева приказаних решења износи 20 (као код претходно приказаних двокритеријумских). Увиђа се да је, услед постојања додатног критеријума па и све теже доминације честица по свим критеријумима, скуп оптималних решења значајно већи. Треба бити врло опрезан при одабиру циљних функција и наћи оптимум између физикалности и применљивости (могућности проналаска оптималног решења).

Табела 4.5. Део Парето фронта добијеног трокритеријумским оптимизационим поступком 2

$n_1$	$\theta_1$ [°]	$n_2$	$\theta_2$ [°]	$m$ [kg]	$u_{tip}$ [mm]	$ nv_{nom} - v_i $ [Hz]	$n = 2n_1 + n_2$
-------	----------------	-------	----------------	----------	----------------	-------------------------	------------------

---

1	75	14	0	0.865	2.357	0.6507	16
2	30	12	0	0.865	2.32	0.5223	16
7	0	2	75	0.865	2.342	0.6577	16
1	45	14	0	0.865	2.315	0.6453	16
5	15	6	75	0.865	2.269	0.6433	16
6	0	4	30	0.865	2.247	0.7047	16
4	75	8	30	0.865	2.231	0.5953	16
3	45	11	15	0.9191	2.203	0.5577	17
2	15	13	75	0.9191	2.127	0.7017	17
6	0	5	60	0.9191	2.075	0.7527	17
5	30	8	75	0.9731	1.979	0.6717	18
7	0	4	60	0.9731	1.946	0.7947	18
3	0	12	45	0.9731	1.928	0.6147	18
6	0	6	60	0.9731	1.927	0.7917	18
2	60	15	15	1.0270	1.865	0.7437	19
3	60	13	15	1.0270	1.839	0.7047	19
5	75	9	15	1.0270	1.818	0.7557	19
2	75	15	0	1.0270	1.906	0.7797	19
7	0	5	45	1.0270	1.780	0.6947	19
2	75	15	15	1.0270	1.859	0.7727	19
7	0	5	15	1.0270	1.879	0.7907	19
2	60	15	0	1.0270	1.874	0.8047	19
7	0	3	45	1.0270	1.814	0.8397	19
2	75	11	15	1.0270	1.813	0.7597	19
3	75	14	0	1.081	1.793	0.8137	20
8	0	4	30	1.081	1.716	0.6820	20
3	60	14	0	1.081	1.760	0.7507	20
7	15	6	75	1.081	1.735	0.6927	20
7	0	6	60	1.081	1.701	0.6677	20
1	60	18	0	1.081	1.776	0.8277	20
2	60	16	0	1.081	1.763	0.8277	20
5	0	10	60	1.081	1.697	0.5467	20

---

Опет, потребни број слојева не сме бити мањи од 16. Иако су заступљене све оријентације, доминантно препоручена оријентација (којом се постиже и мање померање лопатице) је сада такође око нуле.

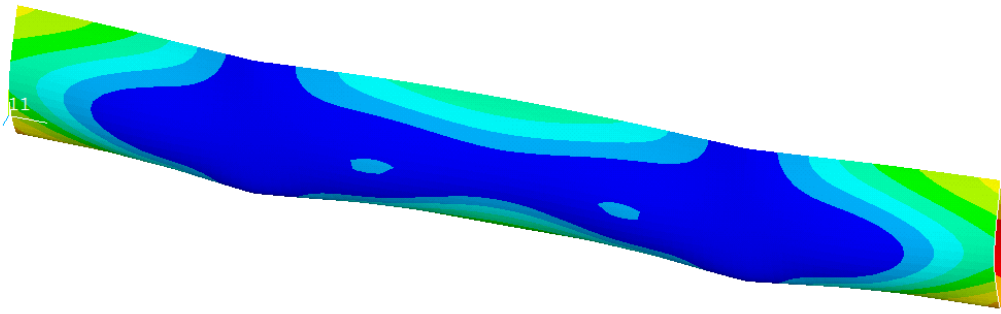
#### 4.4 Изабрани оптимум

Након детаљне анализе и компарације добијених скупова оптималних решења, као оптимум који је касније и израђен и експериментално тестиран изведено је међурешење дефинисано вектором  $\mathbf{X}_{\text{opt}} = [1 \ 0 \ 15 \ 0]$  израђено од бидирекционих платана. Ово решење укљештено је по првој и трећој четвртини и подвргнуто највећим очекиваним аеродинамичким оптерећењима као и одговарајућим гравитационим и центрифугалним. Вредности излазних параметара приказане су у табели 4.6. Изабрани оптимум задовољава наметнуте критеријуме и ограничења, а уједно је лак, економичан и исплатив за производњу.

Табела 4.6. Излазни параметри оптималног решења

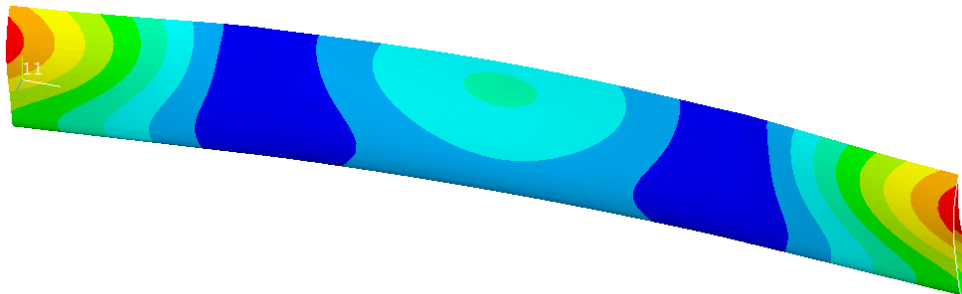
Параметар	Ознака	Јединица	Вредност
Маса	$m$	[kg]	0.9191
Померање краја лопатице	$u_{\text{tip}}$	[mm]	2.191
Разлика фреквенција	$ n\nu_{\text{nom}} - \nu_i $	[Hz]	0.6867
Критеријум лома	$I_F$	[-]	0.6639
1. сопствена фреквенција	$\nu_1$	[Hz]	4.02
2. сопствена фреквенција	$\nu_2$	[Hz]	5.13
3. сопствена фреквенција	$\nu_3$	[Hz]	5.32
4. сопствена фреквенција	$\nu_4$	[Hz]	8.01

Изабрана структура лопатице способна је да издржи различите типове оптерећења којима ће бити изложена у раду што је и илустровано на слици 4.7. Максимална померања прорачуната при статичком оптерећењу, и износе приближно 2 mm, означена су црвеном бојом.

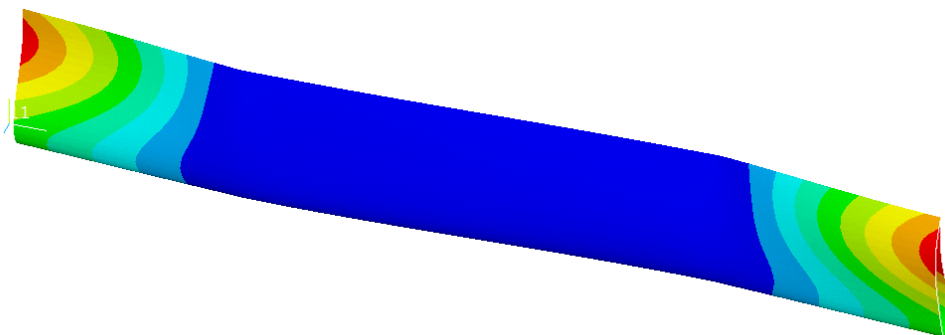


Слика 4.7. Померања одабраног оптималног решења

Прва четири облика осциловања лопатице прорачуната у складу са дефинисаним укљештењем, а који одговарају вредностима сопствених фреквенција из табеле 4.6, приказани су на слици 4.8. Иако су резултујући облици сложени, начелно се може рећи да прва три одговарају савојним модовима, а четврти увојном.

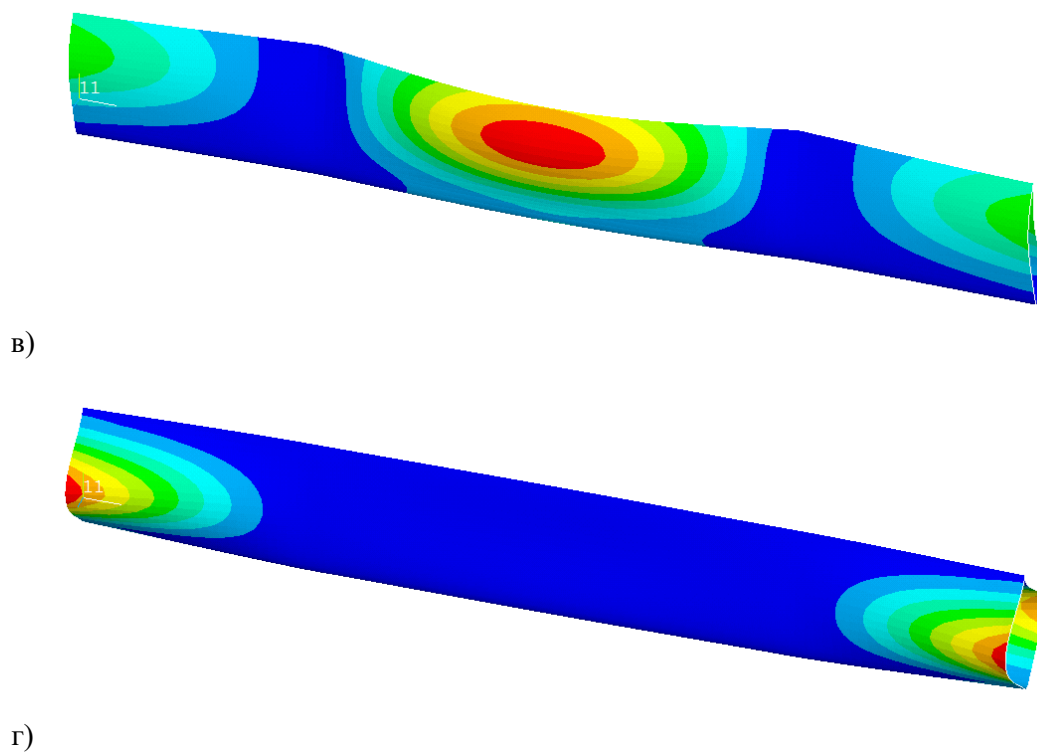


а)



б)





Слика 4.8. Сопствени облици осциловања одабраног оптималног решења: а) 1. мод, б) 2. мод, в) 3. мод, г) 4. мод

## Глава 5

# Израда и експериментално испитивање лопатице са анализом резултата

За разлику од претходних прорачунских, ова глава се превасходно бави реалном структуром композитне лопатице ветротурбине са вертикалном осом обртања, почевши од њеног настанка па све до тестирања. На почетку су укратко описани поступци израде калупа лопатице, а потом и саме лопатице. Дат је детаљан опис припреме експерименталног испитивања структуре који је заснован на два неинванзивна мерна метода: конвенционалном и поузданом – мерним тракама и неконвенционалном, оптичком – методом корелације слике (Digital Image Correlation, DIC). Припремне радње су подразумевале: лепљење мерних трака на површину лопатице и повезивање са мерачем напона, формирање стохастичке шаре, везивање (укљештење) лопатице по два попречна пресека, увођење сила на одговарајућа места и коначно сакупљање и обраду добијених резултата. На крају, добијени експериментални подаци упоређени су и са одговарајућим нумеричким и изведене су детаљне квантитативне и квалитативне анализе и дискусија.

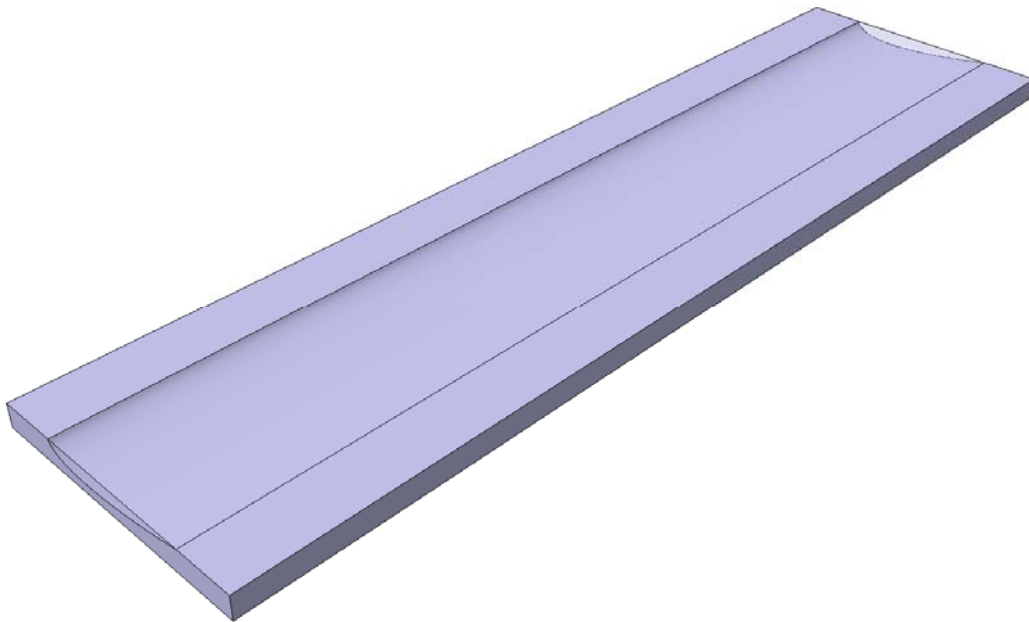
### 5.1 Процес израде лопатице

Процес израде композитних лопатица, и уопште композитних делова, данас подразумева спровођење неколико корака. Најчешће започиње израдом дводелног калупа (горњаке и доњаке), из ког се потом израђују појединачне лопатице. На овај начин, смањује се количина ручног рада моделара, а повећава поновљивост, продуктивност и квалитет производње. Грешке и неправилности

током израде се минимализују. Тачан (и гладак) геометријски облик лопатица важан је, како због аеродинамичких перформанси читавог ротора, тако и због уравнотежења и динамичког понашања обртног система. Генерално, из једног калуца могуће је произвести стотинак лопатица.

### 5.1.1 Израда калуца лопатице - негатива

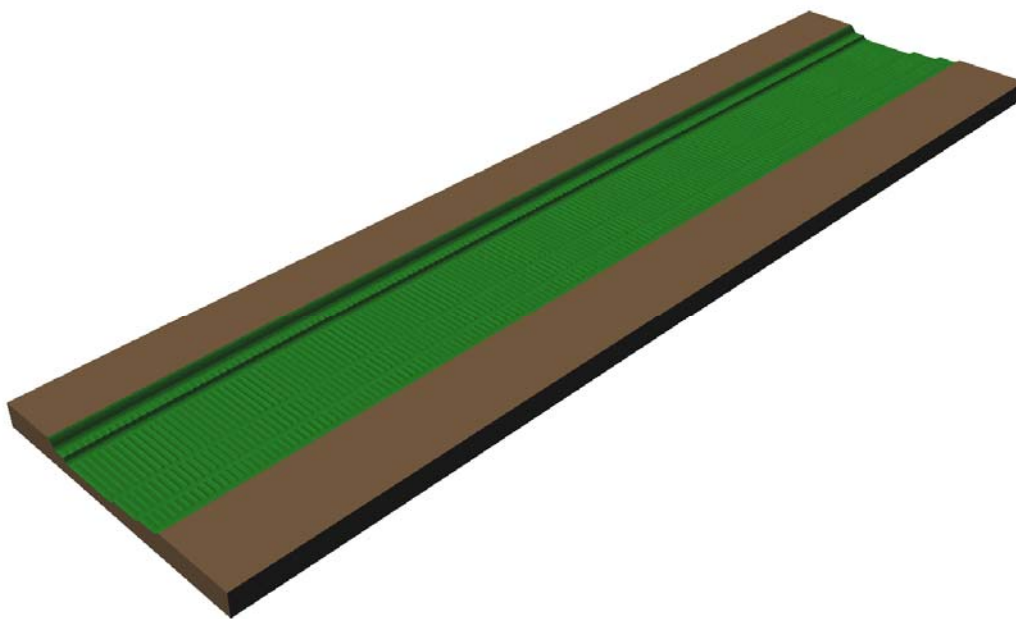
Технологија брзе израде калуца захтева да се цео процес пројектовања и производње врши помоћу рачунара (CAD/CAM) и из једног извора (геометријског модела лопатице) што је веома значајно као начин повећања прецизности и усклађености модела и калуца. Моделирање геометрије врши се у неком од одговарајућих софтверских пакета, а овде је коришћена CATIAv5. У случају ветротурбина са вертикалном осом обртања могуће је значајно смањити цену производње лопатица јер су у питању симетричне, праве геометрије, чији се калуци састоје из два једнака дела. На основу полазног дигиталног тродимензионалног модела лопатице, начињен је модел половине калуца и одговарајућег припремак (слика 5.1), а потом је дефинисан и симулиран његов обрадни процес.



Слика 5.1 Геометријски модел половине калуца и одговарајући припремак

Калуп лопатице (односно његове две идентичне половине) израђен је конвенционалном методом скидања материјала на 3-осној нумерички управљаној глодалици. Овим традиционалним приступом могуће је постићи висок степен прецизности обраде чак и када се користе мекани, јефтине материјали (овде су у питању плоче медијапана МДФ).

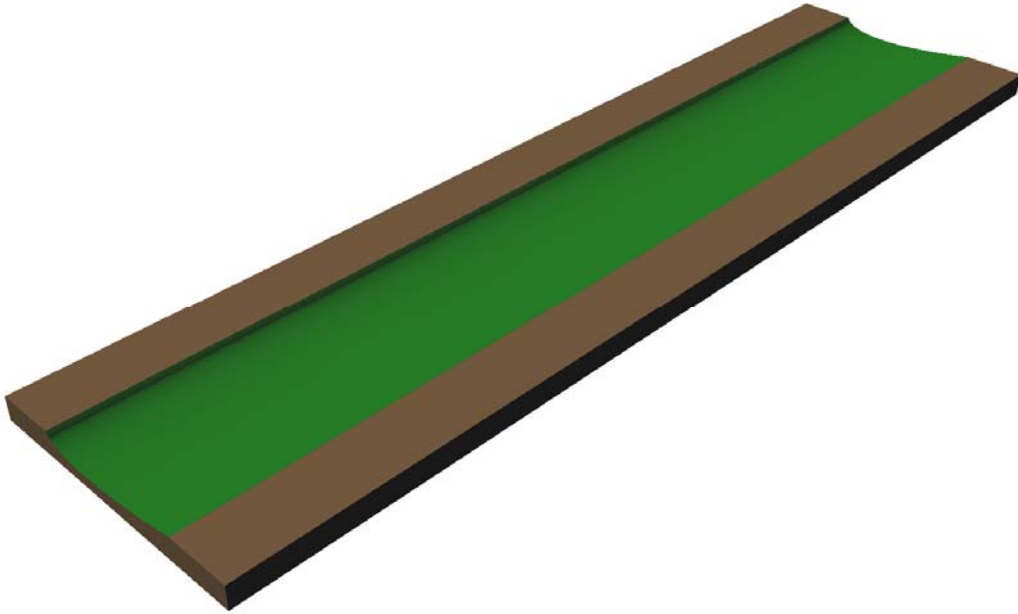
Обрадни процес дефинисан је тако да буде ефикасан, задовољавајуће тачности и у складу са материјалом припремка. Проверен је виртуелно, опет у програмском пакету CATIAv5. Састоји се из два обрадна поступка, грубог (слика 5.2) и финог (слика 5.3), који су изведени сферним глодалом пречника  $\varnothing 12$  mm. Путања алата током грубе обраде била је двосмерна (цик-цак), проценат преклапања пролаза износио је 50%, максимална дубина скидања материјала по пролазу ограничена је на 4 mm, док је цео поступак трајао око 30 min.



Слика 5.2 Прорачунати изглед обратка након прве, грубе обраде

Фина обрада такође је вршена двосмерно, мада са значајно повећаном густином пролаза (максимално растојање између два ограничено је на 0.5 mm) да би се обезбедила задовољавајућа глаткоћа површине, нарочито у близини нападне ивице чија закривљеност је велика. Максимално скидање материјала по пролазу износило је 1 mm, а сам процес трајао је приближно 3 сата.

Након дефинисања задовољавајућег двофазног обрадног процеса, генерисани су потребни g-кодови који су прослеђени нумерички управљаној машини. Слика 5.4 приказује реалан поступак fine обраде једне половине калупа лопатице, док слика 5.5 приказује две израђене половине калупа након fine обраде.



Слика 5.3 Прорачунати изглед обратка након крајње, fine обраде



Слика 5.4 Поступак fine обраде половине калупа лопатице



Слика 5.5 Два израдка половине калуца

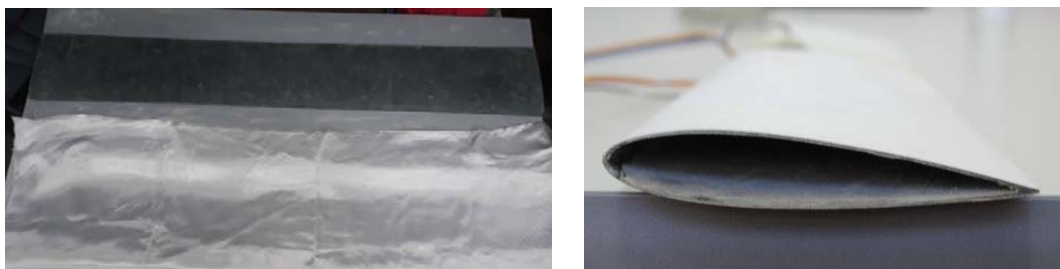
Међутим, да би калуп коначно био употребљив потребно је спровести одређене завршне обраде површине као што су додатно шмирглање, гитовање, премазивање епокси слојевима да би се омогућило лако вађење лопатице из калуца, као и задовољавајућа тачност спољашњих површина што је приказано на слици 5.6.



Слика 5.6 Завршене половине калуца

### 5.1.2 Израда композитне лопатице

Уз помоћ калупа, израђена је композитна лопатица поступком мокрог ређања бидирекционих стаклених платана која је и приказана на слици 5.7. Детаљније о поступку ручног полагања слојева у калуп већ је речено у уводу дисертације. Процес очвршћавања је трајао 90 мин уз помоћ инфра-црвене лампе на 80°C. Коришћени материјали су актуелни у изради и поправци композитних делова уопштено, а и препоручени су од стране водећих произвођача ваздухоплова. Специфична тежина сувих платана BMS 9-3 тип 120 је 107 g/m<sup>2</sup>, а дебљина 0.09 mm. Као лепак употребљен је Хенкел Локтајт ЕА 9396 аеро – епокси смола ниске вискозности и одличних карактеристика на температурама од -55 до 177°C (слика 5.8).



Слика 5.7 Слагање слојева (лево) и коначна лопатица (десно)



Слика 5.8 Материјали-платно и лепак (лево), шема плетења у платну (десно)

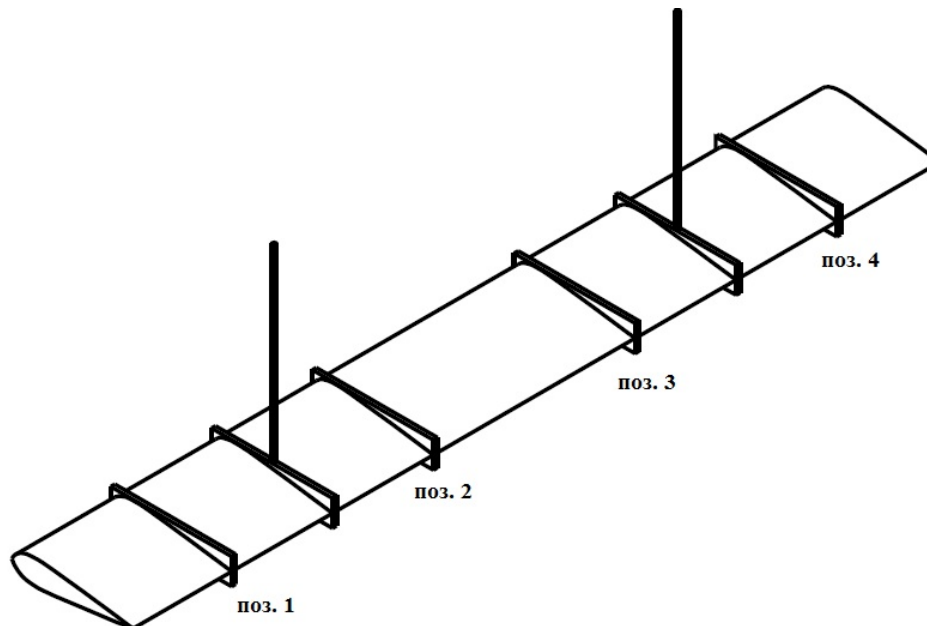
## 5.2 Припрема и ток експеримента

При провери структуре композитне лопатице примењене су две суштински различите мерне технике (и по величини коју мере, и по принципу на којем раде,

и по броју излазних резултата које пружају). Са једне стране, мерење деформација у једном мерном месту мерним тракама високе осетљивости је поуздано и релативно једноставно и доступно. Са друге стране, како је на располагању био и напредни, изузетно скупи, систем за дигиталну корелацију слике, испробано је мерење померања структуре оптичким путем по једном делу површине лопатице који обухвата место на којем су залепљене мерне траке (приближно једној њеној четвртини).

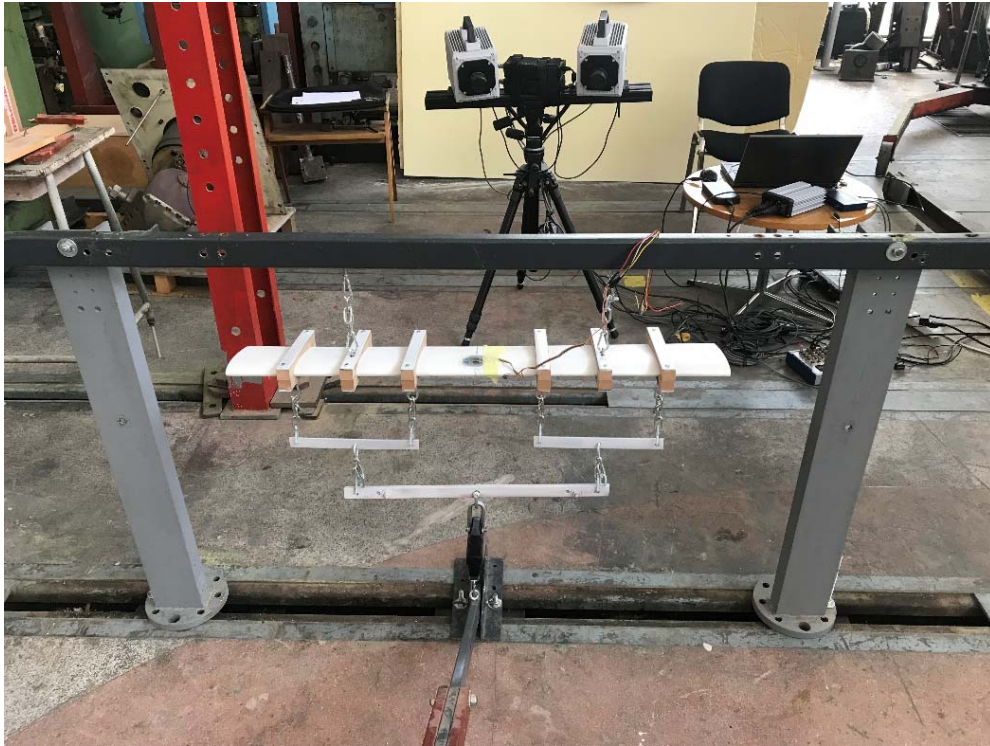
### 5.2.1 Експериментална поставка

Изведено је шест различитих експеримената, који су се разликовали по интензитету и местима уноса сила. Лопатица је укљештена по два попречна пресека (на 25% и 75% дужине  $L$ ), док су силе могле бити унесене по четири различите подужне координате (12.5%, 37.5%, 62.5% и 87.5% дужине  $L$ ). Шематски приказ места укљештења и уноса сила илустрован је на слици 5.9, реална инсталација приказана на слици 5.10, док табела 5.1 приказује интензитете унешених сила у [kg] по експерименту.



Слика 5.9 Шематски приказ места укљештења и уноса сила током експеримента



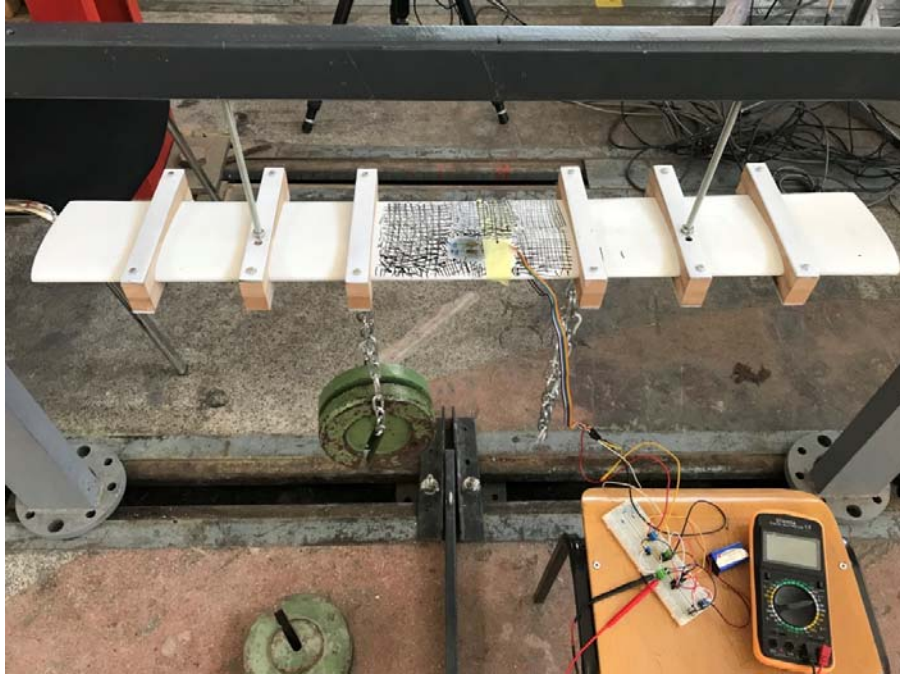


Слика 5.10 Испитна инсталација са постављеном лопатицом

Табела 5.1 Унесене силе током експерименталног испитивања

Експеримент	Позиција 1	Позиција 2	Позиција 3	Позиција 4
1			5 kg	
2			10 kg	
3		5 kg	10 kg	
4		10 kg	10 kg	
5		15 kg	15 kg	
6	10 kg	10 kg	10 kg	10 kg

Примери уношења оптерећења (вешања тегова масе 5 kg и 10 kg) у различитим експериментима приказани су на сликама 5.11 а,б,в,г,д.



а) Унос оптерећења од 10 kg



б) Унос оптерећења од 15 kg



в) Унос оптерећења од 20 kg



г) Унос оптерећења од 30 kg



д) Унос оптерећења од 40 kg

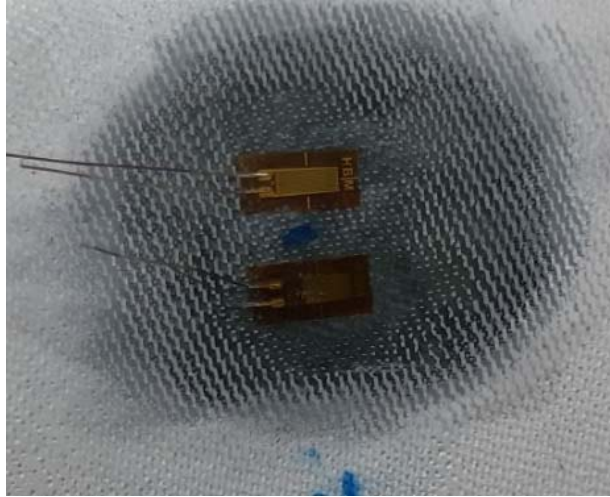
Слика 5.11 Унос сила у експерименту: а) 2, б) 3, в) 4, г) 5, д) 6

### 5.2.2 Мерне траке

Четири мерне траке (две по горњаци, две по доњаци) залепљене су у средишњем делу лопатице (слике 5.12 и 5.13) и повезане су тако да образују пуни Витстонов мост (све четири мерне траке су активне) чиме се избегава утицај температуре на мерење деформације.



Слика 5.12 Позиција мерних трака на лопатици



Слика 5.13 Изглед мерних трака

Излазни напон из мерног моста  $V_o$  може се израчунати на следећи начин:

$$V_o = V_s \left( \frac{R_3}{R_2 + R_3} - \frac{R_4}{R_1 + R_4} \right), \quad (5.1)$$

где  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$  представљају отпорности мерних трака, а  $V_s$  напон напајања.

Како све мерне траке имају исту отпорност, излазни напон се може написати на следећи начин:

$$V_o = V_s \frac{\Delta R}{R}, \quad (5.2)$$

где  $\Delta R$  представља промену у отпорности мерне траке услед њене деформације.

Фактор деформације мерне траке је:

$$k = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon}, \quad (5.3)$$

где  $\varepsilon$  представља деформацију. Заменом израза (5.3) у (5.2), излазни напон се може написати у зависности од деформације:

$$V_o = V_s k \varepsilon. \quad (5.4)$$

Како је овај напон мали, реда величине неколико десетина mV, он ће бити појачан помоћу инструментационог појачавача. Излазни напон из појачавача је у границама од 0 V до напона напајања  $V_s$ . У реалном случају, доња граница је неколико стотина mV изнад нуле, а горња неколико стотина mV испод напона напајања. Излазни напон из појачавача може написати на следећи начин:

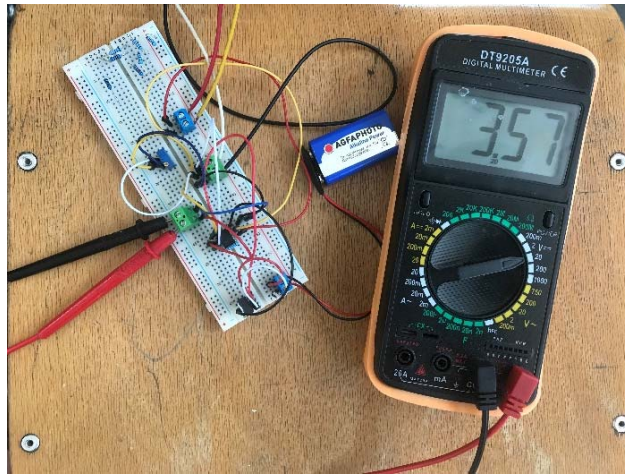
$$V_{\text{Oop}} = AV_{\text{O}} = AV_S k \varepsilon + V_{\text{ref}}, \quad (5.5)$$

где  $V_{\text{ref}}$  представља референтни напон, тј. напон који се доводи на пин “REF” појачавача и он представља излазни напон када је мерни мост у равнотежи. У случају инструментационог појачавача AD623, који се користи у експерименту (слика 5.13), појачање се може израчунати на следећи начин:

$$A = 1 + \frac{100000}{R_G}, \quad (5.6)$$

где  $R_G$  представља отпорност отпорника који се везује између пина 1 и пина 8 појачавача [178]. Заменом израза (5.6) у (5.5) може се добити деформација у функцији излазног напона из појачавача:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{Oop}} - V_{\text{ref}}}{\left(1 + \frac{100000}{R_G}\right) V_S k}, \quad k = 2.08, V_S = 5\text{V}, R_G = 1000\Omega. \quad (5.7)$$



Слика 5.14 Шема отпорника и мерач напона

Измерене вредности излазног напона из појачавача код неоптерећене и оптерећене структуре током спровођења експеримената 1-6 приказане су у табели 5.2. Зарад веће тачности, мерења су поновљена неколико пута. Последња колона приказује вредности деформације израчунате помоћу израза (5.7).

Табела 5.2 Измерени напони и деформације

Експеримент	Неоптерећена лопатица Излазни напон [V]	Оптерећена лопатица Излазни напон [V]	Израчуната деформација $\epsilon$
1	3.15	2.87	$5.90 \cdot 10^{-5}$
2	3.35	2.90	$9.50 \cdot 10^{-5}$
3	3.15	2.40	$1.58 \cdot 10^{-4}$
4	3.30	2.35	$2.00 \cdot 10^{-4}$
5	3.35	1.80	$3.20 \cdot 10^{-4}$
6	3.30	3.23	$1.47 \cdot 10^{-5}$

### 5.2.3 Систем за дигиталну корелацију слике (DIC)

Систем за дигиталну корелацију слике представља неинванзивни, бесконтактни систем за мерење поља померања (и последично поља деформација и напона). Мерење се заснива на прављењу серије секвенцијалних фотографија структуре (у неоптерећеном и оптерећеном стању или током динамичког испитивања) на основу којих се одређује поље померања и површинског напрезања снимљеног објекта. Овај систем базиран је на фотограметрији и модерној компјутерској технологији за мерење пуног поља померања.

Коришћени систем за тродимензионалну дигиталну корелацију слике (DIC систем) приказан на слици 5.15 састоји се из сензорске јединице (одговарајућег пара камера), уређаја за контролу напајања, уређаја за синхронизацију рада камера, уређаја за прикупљање података и пратеће рачунарске јединице за обраду и анализу података.



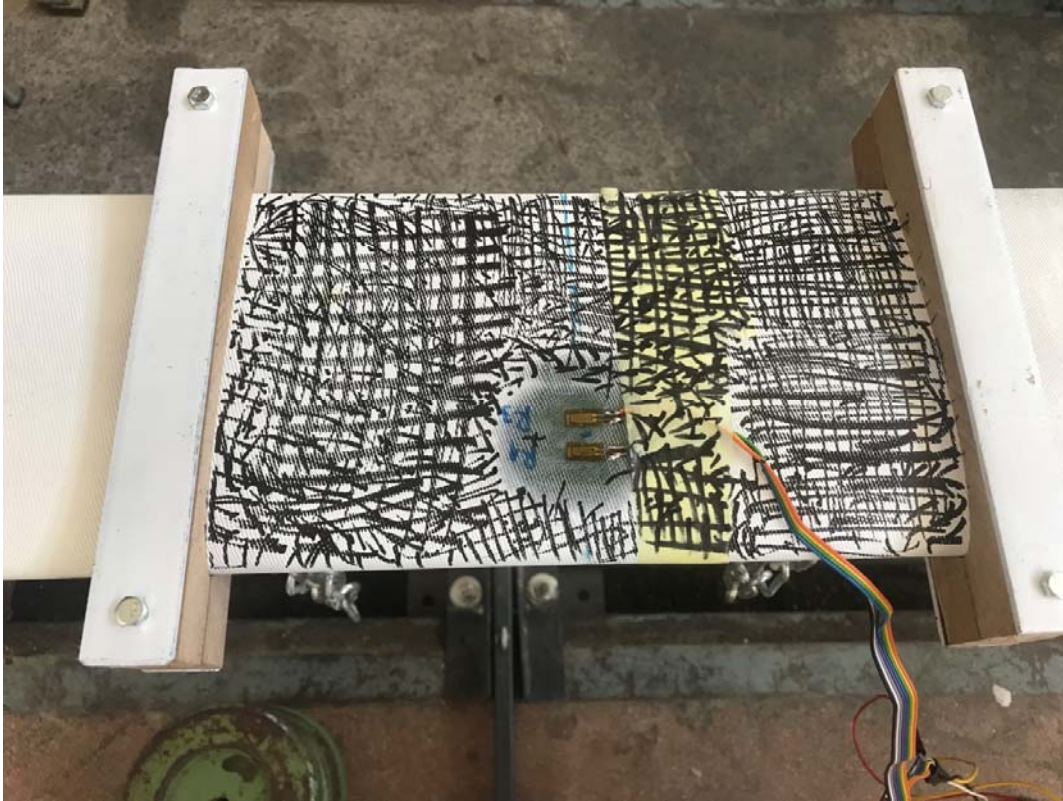


Слика 5.15 Коришћени 3Д DIC систем

Врло важне компоненте коришћеног DIC система су две ултра-брзе, високо-квалитетне камере FASTCAM SA6 75K-M3 следећих карактеристика: сочива жижне даљине 50 mm, 32 GB меморије, максималне учестаности снимања 75000 fps и максималне резолуције слике од 1920×1440 пиксела при чему је један пиксел сензора димензије 10  $\mu\text{m}$ . Тежина једне камере је приближно 7 kg. Иако су ове камере способне за брзо снимање, у овом статичком испитивању, брзина снимања није била од важности јер су прављени појединачни снимци пре и након уношења оптерећења (недеформисаног и деформисаног стања структуре). Из истог разлога, било је могуће правити снимке веће резолуције, а овде је величина слика износила 1024×1024 пиксела што је било у складу са изабраном мерном површином.

Пре почетка самог експеримента, потребно је извршити неколико корака. Пре свега, површина тестиране структуре мора бити адекватно припремљена. Потребно је нанети одговарајући патерн – стохастичку шару чије тачке одговарају пикселима на фотографијама. Потребно је напоменути да током извођења експеримента патерн мора остати непромењен због праћења померања и сакупљања тачних и прецизних података. Тај контраст шаре је најчешће црно-бели (због бољег распознавања), тако да је у овом случају на белу површину лопатице нанесен шаблон црне боје приказан на слици 5.16.



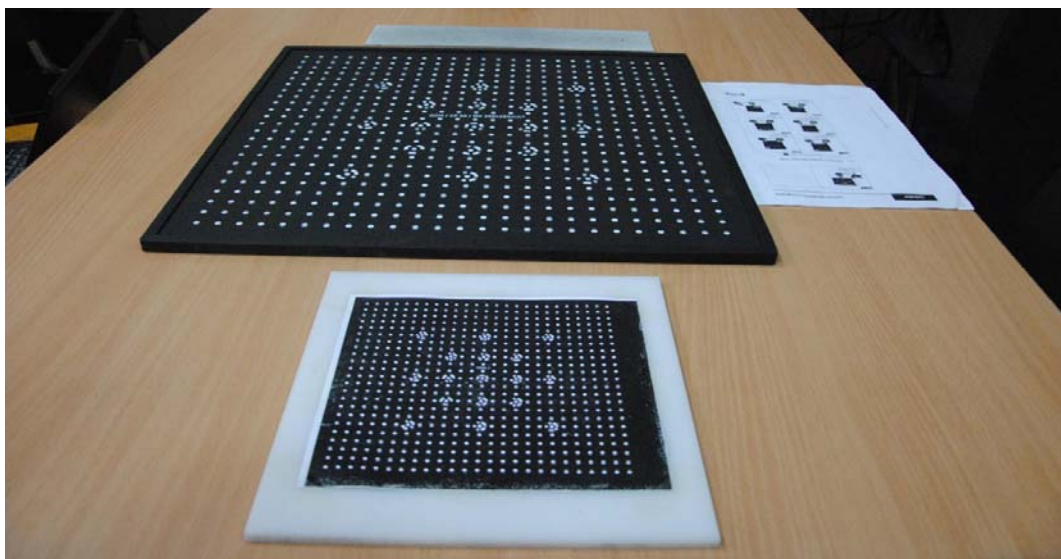


Слика 5.16 Нанесени црно-бели шаблон

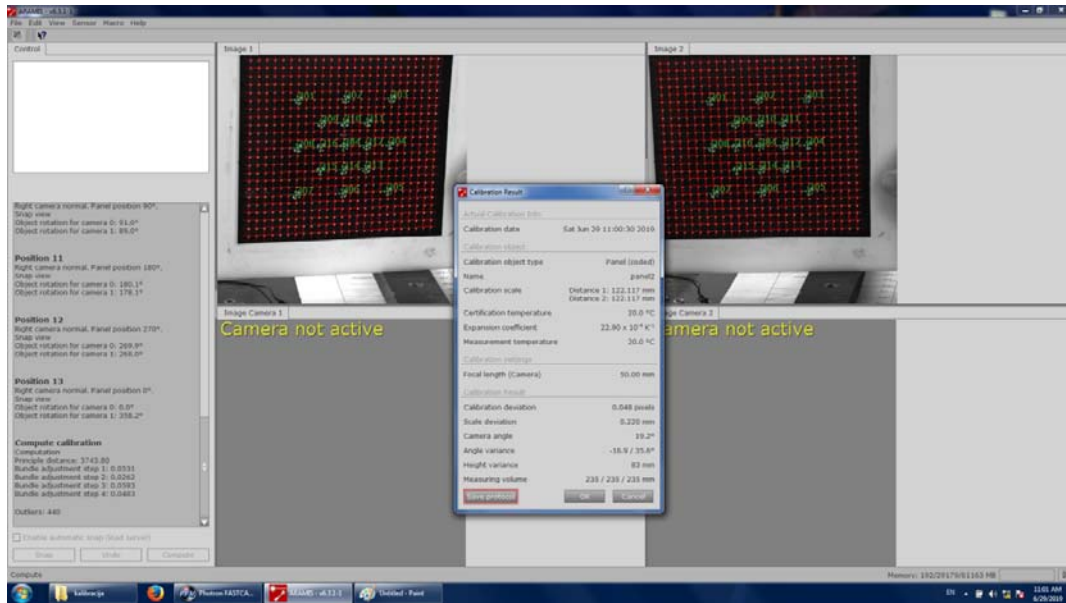
Такође, потребно је извести прво хардверско, а потом и софтверско подешавање, односно калибрацију система. Хардверско подешавање се пре свега односи на подешавање сензорске јединице (камера). Потребно је правилно позиционирати камере у простору тако да гледају у жељени део површине по коме се и врши мерење померања. У зависности од спољашњег осветљења врши се отварање бленде сочива, док се у зависности од удаљености камера од мерног објекта врши одговарајуће фокусирање сочива. Све ове активности спроводе се у складу са упутствима датим од стране произвођача.

Након хардверског подешавања, систем се софтверски калибрише помоћу калибрационих тела – објеката чије су карактеристичне дужине познате и омогућавају скалирање видног поља камера на апсолутне мере. Величина и димензије калибрационих плоча бирају се према доступним камерама и величини мерне површине која се испитује. Калибрационе плоче, приказане на слици 5.17, садрже податке о размери (растојању две референтне тачке), при чему се опет сам поступак калибрације спроводи према врло прецизно дефинисаној процедури. У

конкретном случају, одговарајућа калибрациона плоча постављана је у 13 положаја различитих по удаљености од и усмерености ка камерама. Снимање потребних фотографија вршено је у програму PHOTRON, и након обраде снимака у ARAMIS-у формиран је неопходни калибрациони фајл, приказан на слици 5.18. У сваком кораку калибрације, софтвер мора да препозна референтне тачке калибрационе плоче да би поступак мерења био исправан и дао прецизне резултате. Уколико је калибрација успешно спроведена може се наставити са процесом испитивања. Начелна препорука је да вредност одступања буде у опсегу од 0.01 до 0.04 пиксела, али то наравно зависи од величине слике. У изведеним мерењима одзива структуре композитне лопатице, одступање (тачност мерења) је износило 0.048 пиксела (у односу на димензију слике која износи 1024 пиксела, грешка мерења износи приближно 0.005%). Димензије резултујуће кубне мерне запремине су (235×235×235) mm услед чега је и снимана приближно петина површине лопатице (око 20 cm). Све време током процеса снимања, деформисана структура не треба да изађе из граница мерне запремине.



Слика 5.17 Коришћене калибрационе плоче



Слика 5.18 Пример калибрационог фајла

Прављење снимака структуре реализовано је помоћу комерцијалног софтвера PHOTRON. Лопатица је најпре снимљена у недеформисаном стању, а затим су снимани промењени положаји структуре услед дејства задатих оптерећења. Потом су добијене фотографије увезене у комерцијални програмски пакет за обраду и прорачун резултата ARAMIS. Софтвер анализира и упоређује стање структуре пре и после деформисања. ARAMIS мери деформације у опсегу од 0.01 до 2000%, као и померања до 1  $\mu\text{m}$ , што је значајно при мерењу тродимензионалних померања и одређивању понашања реалне структуре. Предност DIC поступка је визуелизација просторног поља померања на местима геометријских неправилности структуре, тако да се могу директно поредити са резултатима добијеним методом коначних елемената са високим степеном прецизности.

ARAMIS софтвер прорачунава координате истачкане структуре математичком анализом (корелацијом) „фасета“ – елементарних делова слике, снимљених левом и десном камером. Снимљене дводимензионалне координате се помоћу две камере и калибрационог фајла преводе на просторне, тродимензионалне. Даљим поређењем координата тачака у два узастопна стејца могуће је добити и комплетно поље померања (што је и рађено током приказаних

експериментално). Димензије „фасета“ се бирају у складу са величином испитиване површине и финоћом нанесеног шаблона и у овом мерењу су износиле (15×12) пиксела. Да би се убрзала анализа направљених снимака, могуће је дефинисати маску којом се не разматра део фотографија који се не односи на истачкану површину по којој се врши мерење.

### 5.3 Анализа и дискусија резултата

У наставку је изложена анализа, поређење и дискусија три различита типа резултата – експерименталних података добијених мерним тракама и методом корелације слике и нумеричких добијених методом коначних елемената. Услед специфичности обе експерименталне и прорачунске методе и разноврсности резултата које је могуће добити, као и начина на који је лопатица везана за носач, поклапања између резултата су различитог карактера. Из тог разлога, извршена су и два типа поређења, квантитативно (где се врши поређење између посредно измерених и прорачунатих апсолутних вредности деформације структуре у једној тачки/ мерном месту) и квалитативно (где се приказује читаво поље померања или деформација структуре).

#### 5.3.1 Квантитативно поређење

Нумеричке структуралне анализе изведене су тако да што више одговарају експерименталној поставци. Лопатица је укљештена по првој и трећој четвртини (25% и 75% дужине лопатице), док су нормалне силе увођене на четири места која одговарају релативним подужним координатама од 12.5%, 37.5%, 62.5% и 87.5% што је требало да имитира континуално оптерећење по лопатици.

Како је мерним тракама мерена укупна осредњена деформација по попречном пресеку смештеном на половини лопатице (на 50% дужине  $L$ ), а у близини положаја највеће дебљине аеропрофила (око 30% тетивес), као резултат нумеричких симулација превасходно су разматрана поља деформација по лопатици. Једна од основних предности нумеричких анализа је што се може добити промена разматране величине по читавој структури (овде у сваком чвору

сваког коначног елемента). Како је мерна површина мерних трака већа од једне тачке(чвора), анализирани су вредности три чвора смештени у непосредној близини региона у коме су позициониране (залепљене) мерне траке. Ти референтни чворови су у наставку обележени бројевима 1, 2 и 3, док суфикс *a* или *b* означава припадање чвора горњаци или доњаци, редом. Тако је прорачуната осредњена укупна деформација на месту *i* добијена као аритметичка средина укупних деформација у одговарајућим чворовима на горњаци и доњаци:

$$\varepsilon^i = \frac{\varepsilon_a^i + \varepsilon_b^i}{2}. \quad (5.8)$$

Прорачуната поља деформација у три референтна чвора за сваки од шест случајева оптерећења који су и експериментално тестирани приказана су табеларно, табеле 5.3-5. Прва колона указује на редни број чвора, следеће три садрже компоненте деформације по три основна правца –  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$ , док четврта колона приказује интензитет деформације  $\varepsilon$  у сваком чвору. У претпоследњој колони дата је нумерички процењена осредњена вредност интензитета деформације по горњаци и доњаци  $\varepsilon_{sr}^{num}$ , док је у последњој колони поменутих табела поновљена измерена вредност укупне деформације  $\varepsilon_{sr}^{exp}$  ради лакшег и јаснијег поређења са нумеричким резултатима.

Табела 5.3 Деформације у чворовима лопатице у случају оптерећења 1

Чвор	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_3$	$\varepsilon$	$\varepsilon_{sr}^{num}$	$\varepsilon_{sr}^{exp}$
1a	$2.85 \cdot 10^{-5}$	$6.40 \cdot 10^{-6}$	$-4.77 \cdot 10^{-5}$	$7.62 \cdot 10^{-5}$	$6.42 \cdot 10^{-5}$	
1b	$2.71 \cdot 10^{-5}$	$-6.61 \cdot 10^{-7}$	$-2.51 \cdot 10^{-5}$	$5.21 \cdot 10^{-5}$		
2a	$2.08 \cdot 10^{-5}$	$7.63 \cdot 10^{-6}$	$-4.37 \cdot 10^{-5}$	$6.44 \cdot 10^{-5}$	$5.36 \cdot 10^{-5}$	$5.90 \cdot 10^{-5}$
2b	$2.34 \cdot 10^{-5}$	$-1.40 \cdot 10^{-6}$	$-1.93 \cdot 10^{-5}$	$4.27 \cdot 10^{-5}$		
3a	$1.38 \cdot 10^{-5}$	$8.86 \cdot 10^{-6}$	$-4.04 \cdot 10^{-5}$	$5.41 \cdot 10^{-5}$	$4.48 \cdot 10^{-5}$	
3b	$2.11 \cdot 10^{-5}$	$-2.22 \cdot 10^{-6}$	$-1.44 \cdot 10^{-5}$	$3.56 \cdot 10^{-5}$		

Табела 5.4 Деформације у чворовима лопатице у случају оптерећења 2

Чвор	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_3$	$\varepsilon$	$\varepsilon_{sr}^{num}$	$\varepsilon_{sr}^{exp}$
1a	$5.70 \cdot 10^{-5}$	$1.28 \cdot 10^{-5}$	$-9.54 \cdot 10^{-5}$	$1.52 \cdot 10^{-4}$	$1.28 \cdot 10^{-4}$	$9.50 \cdot 10^{-5}$
1b	$5.41 \cdot 10^{-5}$	$-1.32 \cdot 10^{-6}$	$-5.01 \cdot 10^{-5}$	$1.04 \cdot 10^{-4}$		

2a	$4.15 \cdot 10^{-5}$	$1.53 \cdot 10^{-5}$	$-8.73 \cdot 10^{-5}$	$1.29 \cdot 10^{-4}$	$1.07 \cdot 10^{-4}$
2б	$4.69 \cdot 10^{-5}$	$-2.79 \cdot 10^{-6}$	$-3.85 \cdot 10^{-5}$	$8.54 \cdot 10^{-5}$	
3a	$2.75 \cdot 10^{-5}$	$1.77 \cdot 10^{-5}$	$-8.07 \cdot 10^{-5}$	$1.08 \cdot 10^{-4}$	$8.97 \cdot 10^{-5}$
3б	$4.22 \cdot 10^{-5}$	$-4.45 \cdot 10^{-6}$	$-2.89 \cdot 10^{-5}$	$7.11 \cdot 10^{-5}$	

Како је разлика између првог и другог експеримента само у интензитету силе (у другом случају је дупло већа) која је примењена на истом месту (на 62.5% дужине  $L$ ), нумерички резултати приказани у табели 5.4 су такође двоструке вредности одговарајућих деформација из табеле 5.3. Измерена вредност такође прати тај тренд линеарних промена, мада је однос вредности нешто мањи од 2, што се може делимично објаснити малим силама и деформацијама, па тиме и повећаном грешком мерења. Иначе, поклапање нумеричких и експерименталних резултата може се сматрати задовољавајућим. Такође делује да мерне траке дају резултате најприближније оним у положају 2.

Табела 5.5 Деформације у чворовима лопатице у случају оптерећења 3

Чвор	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_3$	$\varepsilon$	$\varepsilon_{sr}^{num}$	$\varepsilon_{sr}^{exp}$
1a	$8.30 \cdot 10^{-5}$	$1.92 \cdot 10^{-5}$	$-1.41 \cdot 10^{-4}$	$2.24 \cdot 10^{-4}$	$1.85 \cdot 10^{-4}$	
1б	$7.65 \cdot 10^{-5}$	$-1.98 \cdot 10^{-6}$	$-7.06 \cdot 10^{-5}$	$1.47 \cdot 10^{-4}$		
2a	$6.23 \cdot 10^{-5}$	$2.29 \cdot 10^{-5}$	$-1.31 \cdot 10^{-4}$	$1.93 \cdot 10^{-4}$	$1.60 \cdot 10^{-4}$	$1.58 \cdot 10^{-4}$
2б	$7.01 \cdot 10^{-5}$	$-4.19 \cdot 10^{-6}$	$-5.76 \cdot 10^{-5}$	$1.28 \cdot 10^{-4}$		
3a	$3.91 \cdot 10^{-5}$	$2.66 \cdot 10^{-5}$	$-1.19 \cdot 10^{-4}$	$1.58 \cdot 10^{-4}$	$1.30 \cdot 10^{-4}$	
3б	$6.07 \cdot 10^{-5}$	$-6.67 \cdot 10^{-6}$	$-4.07 \cdot 10^{-5}$	$1.01 \cdot 10^{-4}$		

Табела 5.6 Деформације у чворовима лопатице у случају оптерећења 4

Чвор	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_3$	$\varepsilon$	$\varepsilon_{sr}^{num}$	$\varepsilon_{sr}^{exp}$
1a	$1.10 \cdot 10^{-4}$	$2.56 \cdot 10^{-5}$	$-1.87 \cdot 10^{-4}$	$2.97 \cdot 10^{-4}$	$2.46 \cdot 10^{-4}$	
1б	$1.01 \cdot 10^{-4}$	$-2.64 \cdot 10^{-6}$	$-9.33 \cdot 10^{-5}$	$1.95 \cdot 10^{-4}$		
2a	$8.30 \cdot 10^{-5}$	$3.05 \cdot 10^{-5}$	$-1.75 \cdot 10^{-4}$	$2.58 \cdot 10^{-4}$	$2.14 \cdot 10^{-4}$	$2.00 \cdot 10^{-4}$
2б	$9.35 \cdot 10^{-5}$	$-5.59 \cdot 10^{-6}$	$-7.67 \cdot 10^{-5}$	$1.70 \cdot 10^{-4}$		
3a	$5.18 \cdot 10^{-5}$	$3.54 \cdot 10^{-5}$	$-1.58 \cdot 10^{-4}$	$2.10 \cdot 10^{-4}$	$1.72 \cdot 10^{-4}$	
3б	$8.05 \cdot 10^{-5}$	$-8.89 \cdot 10^{-6}$	$-5.38 \cdot 10^{-5}$	$1.34 \cdot 10^{-4}$		

Табела 5.7 Деформације у чворовима лопатице у случају оптерећења 5

Чвор	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_3$	$\varepsilon$	$\varepsilon_{sr}^{num}$	$\varepsilon_{sr}^{exp}$
1a	$1.65 \cdot 10^{-4}$	$3.84 \cdot 10^{-5}$	$-2.81 \cdot 10^{-4}$	$4.46 \cdot 10^{-4}$	$3.69 \cdot 10^{-4}$	
1б	$1.52 \cdot 10^{-4}$	$-3.96 \cdot 10^{-6}$	$-1.40 \cdot 10^{-4}$	$2.92 \cdot 10^{-4}$		
2a	$1.25 \cdot 10^{-4}$	$4.58 \cdot 10^{-5}$	$-2.62 \cdot 10^{-4}$	$3.86 \cdot 10^{-4}$	$3.21 \cdot 10^{-4}$	$3.20 \cdot 10^{-4}$
2б	$1.40 \cdot 10^{-4}$	$-8.38 \cdot 10^{-6}$	$-1.15 \cdot 10^{-4}$	$2.55 \cdot 10^{-4}$		
3a	$7.76 \cdot 10^{-5}$	$5.32 \cdot 10^{-5}$	$-2.37 \cdot 10^{-4}$	$3.15 \cdot 10^{-4}$	$2.58 \cdot 10^{-4}$	
3б	$1.21 \cdot 10^{-4}$	$-1.33 \cdot 10^{-5}$	$-8.07 \cdot 10^{-5}$	$2.01 \cdot 10^{-4}$		

Са повећањем интензитета унесених сила долази и до очекиваног последичног пораста деформација. Промене су приближно линеарне што и одговара области еластичних деформација структуре и може се сматрати изразито задовољавајућим јер обезбеђује константан геометријски облик лопатице, а тиме и њен правилан и поуздан рад.

Табела 5.8 Деформације у чворовима лопатице у случају оптерећења 6

Чвор	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_3$	$\varepsilon$	$\varepsilon_{sr}^{num}$	$\varepsilon_{sr}^{exp}$
1a	$8.15 \cdot 10^{-5}$	$-6.79 \cdot 10^{-6}$	$-6.11 \cdot 10^{-5}$	$1.43 \cdot 10^{-4}$	$1.58 \cdot 10^{-4}$	
1б	$8.70 \cdot 10^{-5}$	$-2.01 \cdot 10^{-7}$	$-8.64 \cdot 10^{-5}$	$1.73 \cdot 10^{-4}$		
2a	$5.95 \cdot 10^{-5}$	$-4.20 \cdot 10^{-6}$	$-4.69 \cdot 10^{-5}$	$1.06 \cdot 10^{-4}$	$1.22 \cdot 10^{-4}$	$1.47 \cdot 10^{-5}$
2б	$7.51 \cdot 10^{-5}$	$-3.93 \cdot 10^{-6}$	$-6.33 \cdot 10^{-5}$	$1.38 \cdot 10^{-4}$		
3a	$3.29 \cdot 10^{-5}$	$-6.17 \cdot 10^{-7}$	$-3.10 \cdot 10^{-5}$	$6.39 \cdot 10^{-5}$	$8.01 \cdot 10^{-5}$	
3б	$6.05 \cdot 10^{-5}$	$-8.24 \cdot 10^{-6}$	$-3.58 \cdot 10^{-5}$	$9.64 \cdot 10^{-5}$		

У последњем случају, када су силе равномерно распоређене по четири пресека лопатице, долази до смањења деформација структуре у средишњем региону. Иако постоји размимоилажење између два типа резултата (измерене вредности нешто су ниже од прорачунатих), тренд смањења и промене смера деформација репродукован је и у нумеричким симулацијама (добијене су ниже вредности деформација него у било ком другом разматраном случају). Одступања нумеричких од експерименталних резултата могу се објаснити смањеном тачношћу мерења као и увођењем одређених идеализација у нумеричким

симулацијама (равномерне расподеле сила и по тетиви и по размаху, апсолутно укљештење итд).

У наставку су добијени нумерички резултати по целој лопатици приказани графички, слика 5.19. Опсег вредности деформације на графицима је  $[0, 0.001]$ , где плавој боји одговара минимална, а црвеној максимална вредност.



а)

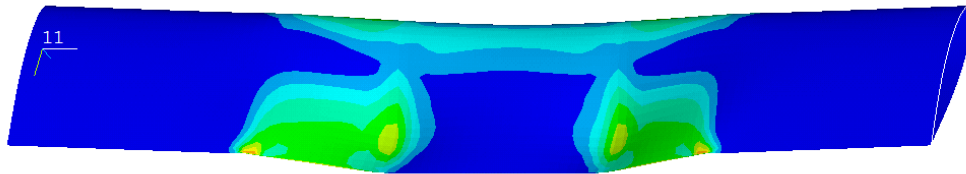


б)

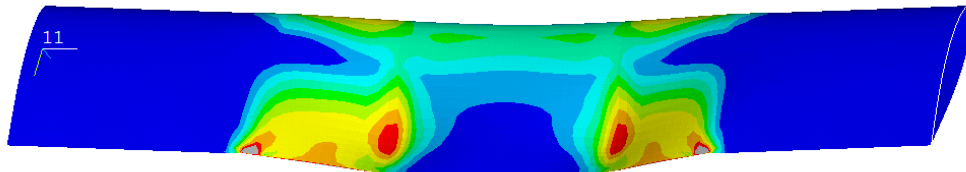


в)

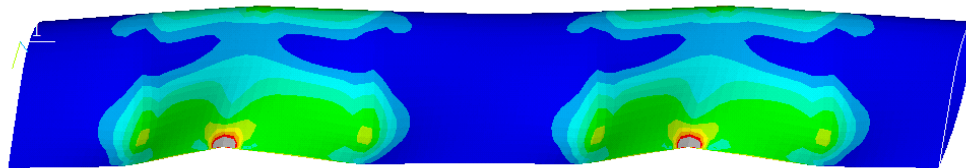




г)



д)



ђ)

Слика 5.19 Поље интензитета деформација по лопатици: а) унесено 5 kg на месту 3, б) унесено 10 kg на месту 3, в) унесено 5 kg на месту 2 и 10 kg на месту 3, г) по 10 kg на местима 2 и 3, д) по 15 kg на местима 2 и 3, ђ) по 10 kg на местима 1, 2, 3 и 4

### 5.3.2 Квалитативна анализа

Слика 5.19 илуструје једну од основних предности нумеричких симулација (поред брзине извршавања и смањених улагања) – могућност добијања жељених величина (померања, деформација, напона, итд.) по читавој структури. На исти начин, оптичке методе којима је могуће снимати делове или целу површину испитиване структуре пружају много детаљнији увид у понашање структуре, јер омогућавају истовремену анализу померања великог броја тачака. Мерне траке, и поред својих бројних предности:

- примењивости на различите структуре,
- постојања различитих шема повезивања,
- високог степена поузданости и тачности,
- примене и на покретним/осцилујућим структурама, и сл,

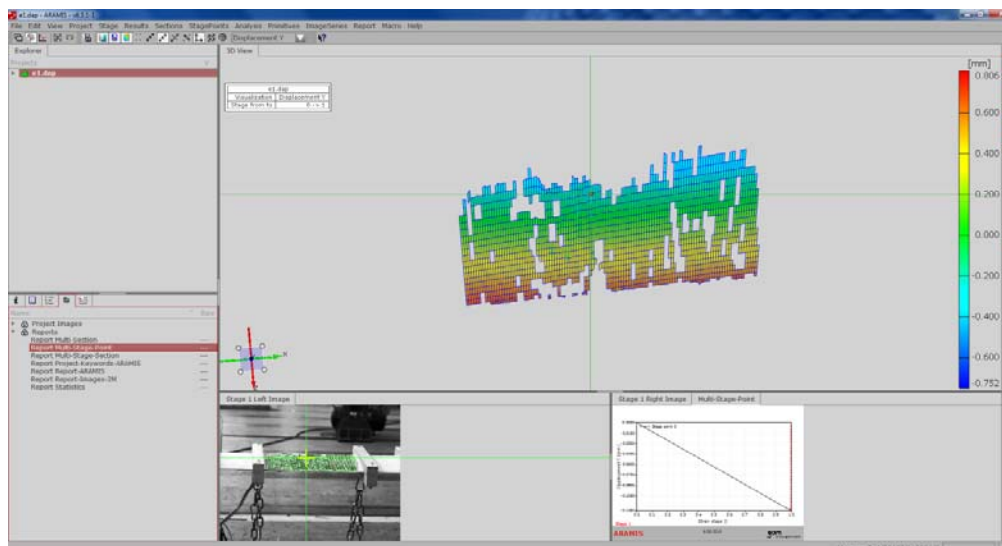
посредно мере деформације само у једној мерној тачки/области. Уколико је потребно разматрање већег броја тачака, потребно је и лепљење више комплета мерних трака. Даље, како се оне везују за обе стране структуре, оне враћају укупну осредњену деформацију целе структуре, а некад је потребно знати шта се тачно дешава на једној површини (нарочито у ваздухопловству где дешавања на горњаци и доњаци могу бити веома различита). У таквим случајевима, примењивост 3Д система за корелацију слике може бити заиста неприкосновена. Он је у стању да са великом тачношћу врати померања тачака по површини, и то у изразито кратким временским интервалима што га чини посебно погодним и за нестационарна, динамичка испитивања структуре. Такође, мерне траке могу се повезати у тзв. полумост, али у том случају излазни напон није линеаран са деформацијом. У последње време се користе и пиезоелектрични сензори, код којих се, захваљујући директном пиезоелектричном ефекту, на електродама генерише наелектрисање пропорционално деформацији које се, затим, помоћу појачавача наелектрисања (“charge amplifier”) претвара у напон [179].

Међутим, постоје извесни недостаци техничког карактера у експерименталној поставци. Како лопатица није била у потпуности укљештена (као што је претпостављано у нумеричким симулацијама) померања структуре су већа од очекиваних. Након уноса оптерећења цела конструкција лопатице и веза

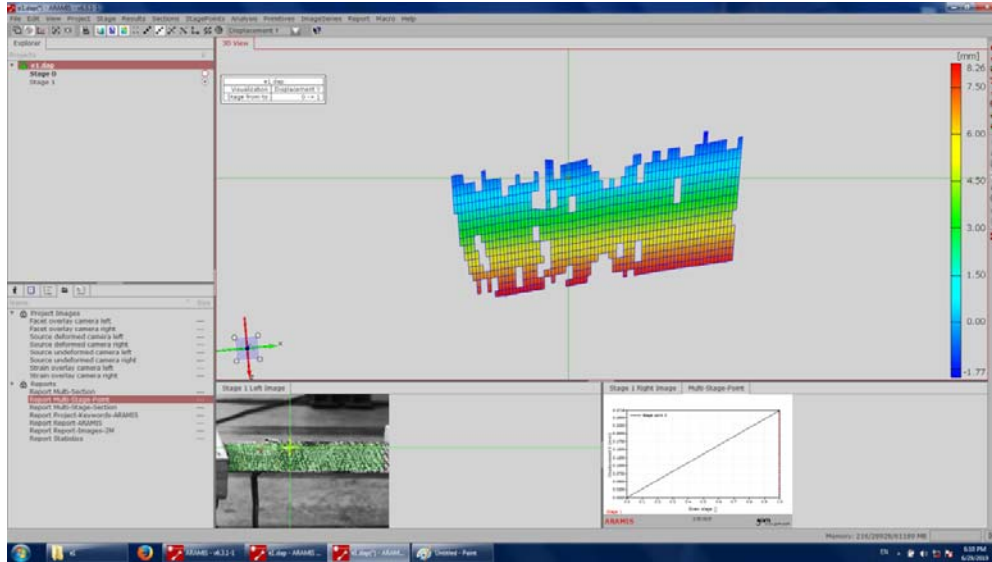
са носачем врши одређено транслаторно кретање (које се мери у mm) па су и регистрована померања тог реда величине. Ово дешавање не представља проблем за мерне траке јер оне ионако региструју само деформацију структуре, али код система који оптички мери померања карактеристичних тачака онемогућава правилну анализу поља деформација. Из тог разлога, приказана анализа је квалитативна, и више од самих апсолутних вредности померања, пружа увид у могућности коришћеног система.

Следећа слика 5.20 илуструје обраду снимљених фотографија у ARAMIS софтверу. По две фотографије, снимљене левом и десном камером, одговарају по једном стејџу. Композитна структура сликана је у неоптерећеном стању и након деловања оптерећења. Померање у  $u$ -правцу (управном на раван лопатице) измерено у једном временском тренутку у глобалном координатном систему мерне области приказано је обојено. Црвена боја одговара највишим, а плава најнижим измереним вредностима. У доњем левом углу приказана је слика снимљене површине лопатице, а у десном дијаграм померања изабране тачке. Приказана је анализа свих шест случајева увођења оптерећења.

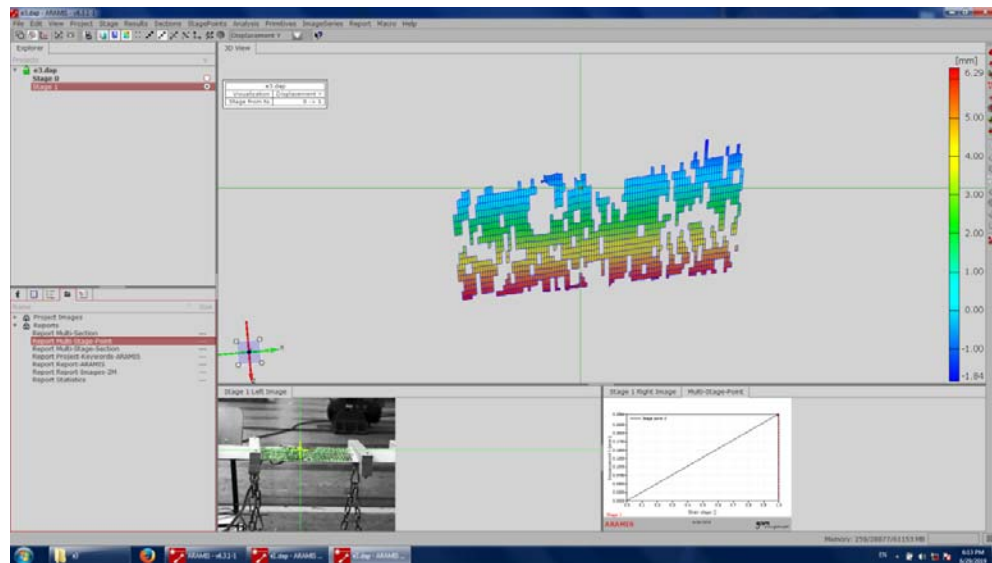
Уочава се да су померања краја лопатице већа него нападне ивице. Такође, код несиметричних случајева оптерећења видљива је и блага асиметрија у резултатима. Непостојећи делови површине указују на нерегуларност нанесеног шаблона, што је могуће превазићи његовом корекцијом или додатним уситњењем.



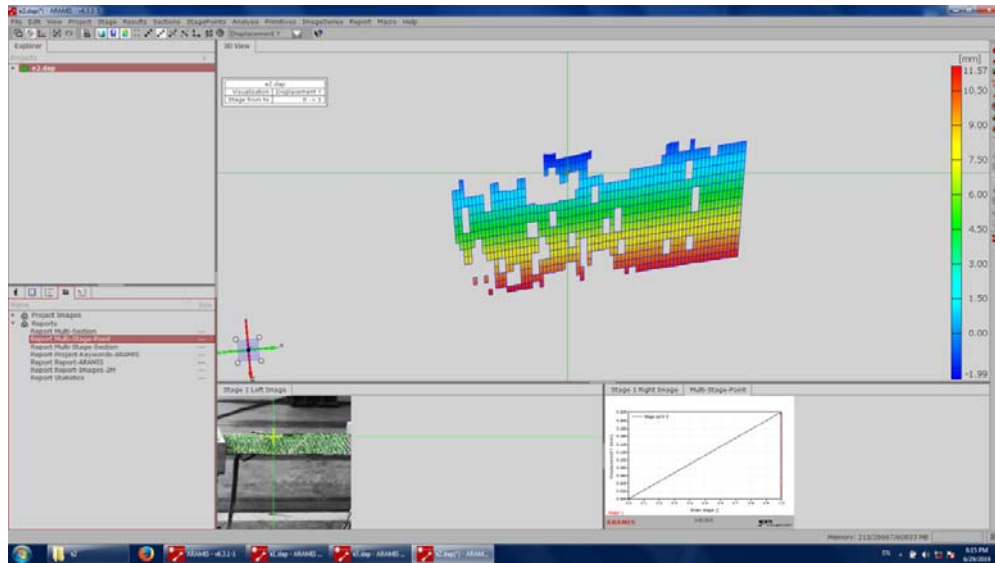
a)



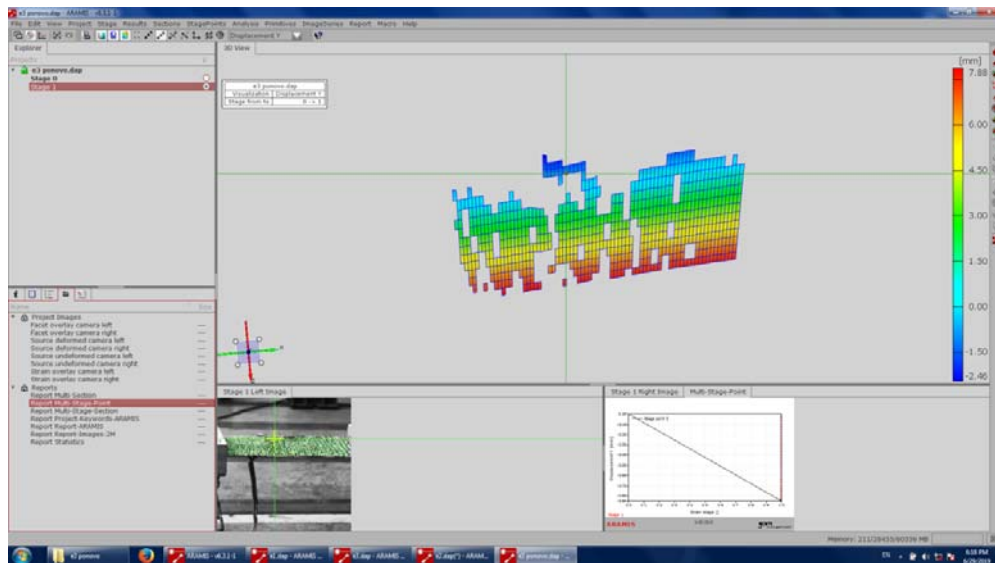
б)



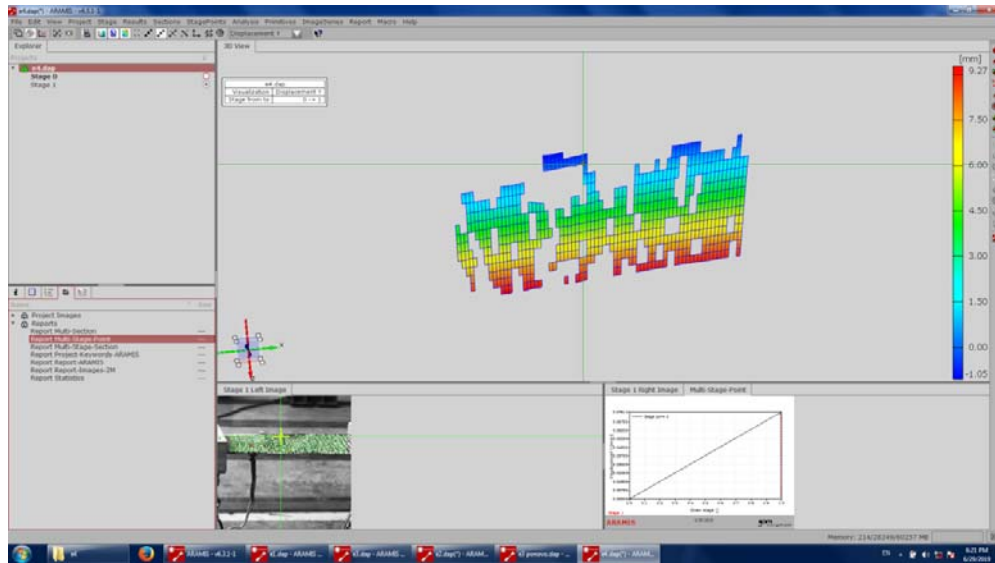
в)



г)



д)



ђ)

Слика 5.20 Анализа у ARAMIS софтверу: а) експеримент 1, б) експеримент 2, в) експеримент 3, г) експеримент 4, д) експеримент 5, ђ) експеримент 6

## Глава 6

### Закључак и препоруке за будући рад

У приказаној дисертацији предмет истраживања је Даријусова ветротурбина мале снаге са три равне композитне лопатице. Прегледом литературе установљено је да ветротурбине са вертикалном осом обртања представљају актуелну тему у свету којом се баве многи аутори, мада нема доступних података да је систематска анализа овог типа ветротурбина рађена у Србији.

На почетку треба истаћи да разматрани концептуални дизајн ротора ветротурбине подразумева мултидисциплинарни приступ – спрезање више научних области као што су аеродинамика, анализа и оптимизација структуре, композитни материјали, рад у различитим софтверским пакетима и познавање програмских језика, технологија производње и експериментална испитивања конвенционалним и неконвенционалним методама. При изради докторске дисертације коришћене су неке од најсавременијих прорачунских и оптимизационих метода који су реализовани применом актуелних, комерцијално доступних, напредних софтверских алата и самостално развијених кодова.

Како је акценат рада на оптимизацији, потребно је рећи да сам оптимизациони процес зависи од много фактора које треба узети у обзир, нпр:

- намена и димензије ветротурбине,
- ко су потенцијални потрошачи,
- локалитет ветротурбине,
- радни век конструкције,
- којим оптерећењима је изложена структура,
- како је могуће најбрже и најтачније прорачунати та оптерећења,
- који су носећи елементи структуре,

- како је структура везана за остале елементе,
- доступност, цена и карактеристике материјала,
- цена и одржавање готовог производа, и сл,

као и од претпоставки (упрошћења и ограничења) које је неопходно увести, а само нека су:

- нестишљиво струјање,
- турбулентно струјање (моделирано турбулентним моделом),
- танка, крута структура,
- идеално (апсолутно) укљештење,
- равномерна расподела сила по лопатици, итд.

Неке од поменутих избора могуће је променити, а уведена ограничења превазићи, али тако да фаза концептуалног дизајна буде извршена у реалном времену. У том смислу, вишекритеријумске оптимизације могу се показати као веома користан алат који омогућава истовремено разматрање више фактора различитог карактера, као и добијање већег броја могућих решења. На инжењеру (пројектанту) је потом да изабере оптимум за који сматра да је заиста најбољи, чак и када је такав производ изведен као комбинација добијених решења (као што је и извршено у овом случају). Односно, вишекритеријумски оптимизациони поступак, поред тога што пружа скуп оптималних решења, може се користити и као помоћно средство које указује на правац могућих побољшања или на релације које постоје између улазних и излазних параметара.

Закључци и доприноси представљене докторске дисертације се могу сумирати на следећи начин:

- детаљно приказана методологија оптимизације структуре као и укратко споменута методологија интегралне аеродинамичко-структуралне оптимизације потврђују да је могуће добити побољшану конструкцију специјално дизајнирану за одабране радне услове и остварити одређене уштеде у пројектантским фазама развоја таквог производа,
- спровођење аеродинамичких прорачуна различите сложености (квази 1Д модели засновани на законима одржања и методе прорачунске механике флуида),



- 3Д анализа опструјавања ротора ветротурбине са вертикалном осом обртања методом коначних запремина,
- прорачуни закривљене ламинатне структуре методом коначних елемената који су применљиви и на великогабаритне структуре,
- интегрална (аеродинамичко-структурална) оптимизација ротора,
- развој сопствених функција за прорачун и оптимизацију,
- повезивање/интеграција прорачунских алата,
- спровођење вишекритеријумских оптимизација ројем честица,
- широка применљивост представљеног поступка – уз брзе и једноставне модификације, поступак оптимизације могуће је променити на било коју полазну геометрију, било који тип структуре уз произвољан избор параметара који се оптимизују, функција циља и ограничења,
- оригиналност се посебно огледа у формирању испитне инсталације за извођење експеримента као и добијеним оригиналним експерименталним резултатима, који пружају могућност наставка истраживања и даљег унапређења дизајна композитних лопатица.

Препоруке за будући рад укључују:

- унапређење аеродинамичког прорачуна коришћењем сложенијих метода прорачунске динамике флуида које подразумевају делимично или потпуно разрешење спектра турбуленције (нпр. LES, DES или DNS – директна нумеричка симулација) за чије реализовање су неопходни прорачунски ресурси много већих капацитета,
- примењена метода прорачуна структуре може се унапредити одређеним изменама: додатним уситњавањем мреже, употребом 3Д коначних елемената, урачунавањем додатних носећих елемената, моделирањем ефеката испуне и спојева на нападној и излазној ивице,
- разматрање лопатице као еластичне структуре, што је неопходно у случајевима разматрања интеракције флуида и структуре или аероеластичних појава,
- развој спрегнутог аеродинамичко-структуралног поступка оптимизације који би подразумевао много већи број улазних и излазних параметара чиме

---

би сам процес оптимизације био знатно компликованији и захтевао веће прорачунске капацитете од оних који су коришћени током израде дисертације,

- експериментално испитивање може се унапредити увођењем реалистичније расподеле оптерећења које би веродостојније симулирало променљиво аеродинамичко оптерећење, употребом пиезоелектричних сензора, као и прецизније мерне опреме.

## Литература

- [1] Међународна агенција за обновљиве изворе енергије, [www.irena.org](http://www.irena.org) (последњи приступ: април 2019.)
- [2] Komusanac I, Fraile D, Brindley G, *Wind energy in Europe in 2018 - Trends and statistics*. WindEurope, Belgium, 2019.
- [3] Министарство енергетике, развоја и заштите животне средине Републике Србије, *Национални акциони план за коришћење обновљивих извора енергије Републике Србије*, „Службени гласник РС“, број 53/2013, 2013.
- [4] Министарство рударства и енергетике Републике Србије, *Регистар повлашћених произвођача електричне енергије*, 2018.
- [5] Министарство рударства и енергетике Републике Србије, *Извештај о спровођењу Националног акционог плана за коришћење обновљивих извора енергије Републике Србије за 2016. и 2017. годину*, 2018.
- [6] Eldridge F.R, *Wind machines:report*, National Science Foundation, The Foundation:for sale by the Supt. of Docs., U.S. Govt. Print. Off., 1975.
- [7] Eriksson S, Bernhoff H, Leijon M, *Evaluation of different turbine concepts for wind power*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12(5):1419-1434, 2008.
- [8] [www.quietrevolution.com](http://www.quietrevolution.com) (последњи приступ: мај 2019.)
- [9] Jones R. M, *Mechanics of Composite Materials 2<sup>nd</sup> Ed.*, Taylor-Francis, Philadelphia, USA, 1999.
- [10] Vasiliev V, Morozov E, *Mechanics and Analysis of Composite Materials*, Elsevier Science, Oxford, UK, 2002.
- [11] Reddy J.N, *Mechanics of Composite Materials: Selected Works of Nicholas J. Pagano*, Springer, USA, 1994.
- [12] Lubin G, *Handbook of composites*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1982.
- [13] Hau E, *Wind Turbines - Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Springer, Berlin, 2006.
- [14] Darrieus G.JM, *Turbine having its Rotating Shaft Transverse to the flow of the Current*, US Patent 1835018, filed October 1926, published December 1931.
- [15] Sheldal R. E, *Comparison of field and wind tunnel Darrieus wind turbine data*, Sandia National Laboratory, Albuquerque, New Mexico (US), SAND80-2469, 1981.

- 
- [16] Blackwell B. F, Sheldahl R. E, and Feltz L.V, *Wind tunnel performance data for the Darrieus wind turbine with NACA 0012 blades*, Sandia National Laboratory, Albuquerque, New Mexico (US), SAND76-0130, 1977.
- [17] Sheldahl R. E, Klimas P. C, and Feltz L. V, *Aerodynamic performance of a 5-metre-diameter turbine with extruded aluminum NACA 0015 blades*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico (US), SAND80-0179, 1980.
- [18] Worstell M. H, *Aerodynamic performance of the 17m diameter Darrieus wind turbine*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico (US), SAND78-1737, 1978.
- [19] Worstell M. H, *Aerodynamic performance of the 17m diameter Darrieus wind turbine in the three-bladed configuration: An addendum*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico (US), SAND79-1753, 1982.
- [20] Ashwill T. D, *Measured data for the Sandia 34-meter vertical axis wind turbine*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico (US), SAND91-222, 1992.
- [21] Bhutta M. M. A. et al, *Vertical axis wind turbine – A review of various configurations and design techniques*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (4), pp. 1926-1939, 2012.
- [22] Beller C, *Urban wind energy - state of the art 2009*, Risø DTU (Technical University of Denmark), Roskilde, Denmark, Risø-R-1668(EN), 2009.
- [23] Anderson J.D. Jr, *Fundamentals of Aerodynamics*. McGraw-Hill, New York, 2001.
- [24] Anderson J.D. Jr, *Computational Fluid Dynamics*. McGraw-Hill, New York, 1995.
- [25] Bertin J.J, Smith M.L, *Aerodynamics for Engineers*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J, 1979.
- [26] Katz J, Plotkin A, *Low Speed Aerodynamics, From Wing Theory to Panel Methods*, McGraw-Hill, Inc., Singapore, 1991.
- [27] Ferziger J.H, Perić M, *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, Berlin, 1992.
- [28] Петровић З, Ступар С, *Пројектовање рачунаром*. Универзитет у Београду, Београд, 1996.

- [29] Чантрак С, *Хидродинамика*. Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, 2005.
- [30] Стефановић З, *Аеропродили*. Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, 2005.
- [31] Комаров Д, *Аеродинамичка оптерећења и оптимизација ветротурбине за специфичне ресурсе ветра на локацијама у Србији*. Докторска дисертација, Машински факултет Универзитета у Београду, 2013.
- [32] Сворцан Ј, *Методологија интегралне анализе и оптимизације аеродинамичких површина ваздухопловних конструкција*. Докторска дисертација, Машински факултет Универзитета у Београду, 2014.
- [33] Islam M, Ting D.S.K, Fartaj A, *Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12 (4), pp. 1087-1109, 2008.
- [34] Paraschivoiu I, *Wind turbine design: with emphasis on darrieus concept*. Polytechnic International Press, Montreal, 2002.
- [35] Paraschivoiu I, *Double-multiple streamtube model for Darrieus wind turbines*. Second DOE/NASA wind turbines dynamics workshop, NASA CP-2186, Cleveland, OH, February, p. 19-25, 1981.
- [36] Paraschivoiu I, Delclaux F, Fraunie P, Beguier C, *Aerodynamic analysis of the Darrieus rotor including secondary effects*. Journal of energy, 7 (5), pp. 416-422, 1983.
- [37] Paraschivoiu I, Delclaux F, *Double multiple streamtube model with recent improvements*. Journal of energy, 7 (3), pp. 250-255, 1983.
- [38] Raciti Castelli M, Englaro A, Benini E, *The Darrieus wind turbine: Proposal for a new performance prediction model based on CFD*. Energy, 36 (8), pp. 4919-4934, 2011.
- [39] Glauert H, *Airplane Propellers, Aerodynamic Theory*, pp. 169-360, 1935.
- [40] Templin R.J, *Aerodynamic performance of vertical-axis wind machines*, ASME, Paper 75-WA/ENER-1, 1975.
- [41] Strickland J.H, *The Darrieus turbine: a performance prediction model using multiple streamtube*. SAND 75-0431, 1975.

- [42] Read S, Sharpe D.J, *An extended multiple streamtube theory for vertical axis wind turbines*, 1980.
- [43] Paraschivoiu I, *Double-multiple streamtube model for studying vertical-axis wind turbines*. Journal of Propulsion and Power, 4 (4), pp. 370-377, 1988.
- [44] Mc Coy, H, Loth, J.L, *Up- and downwind rotor half Interference model for VAWT*. 2nd Terrestrial Energy Systems Conference, AIAA, Colorado Springs, CO, 1981.
- [45] Loth J.L, McCoy H, *Optimization of Darrieus turbines with an upwind and downwind momentum model*. Journal of energy, 7 (4), pp. 313-318, 1983.
- [46] Lanzafame R, Messina M, *Power curve control in micro wind turbine design*. Energy, 35 (2), pp. 556-561, 2010.
- [47] Kishinami K, Taniguchi H, Suzuki J, Imano H, Kazunou T, Turuhami M, *Theoretical and experimental study on the aerodynamic characteristics of a horizontal axis wind turbine*. Energy, 30 (11-12 SPEC. ISS.), pp. 2089-2100, 2005.
- [48] Ceyhan O, Ortakaya Y, Korkem B, Sezer-Uzol N, Tuncer I.H, *Optimization of horizontal axis wind turbines by using BEM theory and genetic algorithm*, 5th Ankara International Aerospace Conference METU, Ankara, AIAC-2009-044, 2009.
- [49] <http://www.q-blade.org> (приступљено 16.04.2019)
- [50] Vassberg J.C, Gopinath A.K, Jameson A, *Revisiting the vertical-axis wind-turbine design using advanced computational fluid dynamics*. 43rd AIAA ASM, Reno, NV, AIAA Paper, p. 0047, 2005.
- [51] Simão Ferreira C.J, Bijl H, Van Bussel, G, Van Kuik G, *Simulating Dynamic Stall in a 2D VAWT: Modeling strategy, verification and validation with Particle Image Velocimetry data*. Journal of Physics: Conference Series, 75 (1), 2007.
- [52] Ferreira C.S, Van Bussel G, Scarano F, Van Kuik G, *2D PIV visualization of dynamic stall on a vertical axis wind turbine*. Collection of Technical Papers - 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 23, pp. 16175-16190, 2007.
- [53] Fujisawa N, Shibuya S, *Observations of dynamic stall on turbine blades*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89 (2), pp. 201-214, 2007.

- [54] Almohammadi K.M, Ingham D.B, Pourkashanian M, *Modeling dynamic stall of a straight blade vertical axis wind turbine*. Journal of Fluids and Structures, 57, pp. 144-158, 2015.
- [55] Buchner A.J, Lohry M.W, Martinelli L, Soria J, Smits A.J, *Dynamic stall in vertical axis wind turbines: Comparing experiments and computations*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 146, pp. 163-171, 2015.
- [56] Buchner A.J, Soria J, Honnery D, Smits A.J, *Dynamic stall in vertical axis wind turbines: Scaling and topological considerations*. Journal of Fluid Mechanics, 841, pp. 746-766, 2018.
- [57] Sharma A, Visbal M, *Numerical investigation of the effect of airfoil thickness on onset of dynamic stall*. Journal of Fluid Mechanics, 870, pp. 870-900, 2019.
- [58] Franchina N, Persico G, Savini M, *2D-3D Computations of a Vertical Axis Wind Turbine Flow Field: Modeling Issues and Physical Interpretations*. Renewable Energy, pp. 1170-1189, 2019.
- [59] Zhong J, Li J, Guo P, Wang Y, *Dynamic stall control on a vertical axis wind turbine aerofoil using leading-edge rod*. Energy, pp. 246-260, 2019.
- [60] Kumar V, Paraschivoiu M, Paraschivoiu I, *Low Reynolds number vertical axis wind turbine for Mars*. Wind Engineering, 34 (4), pp. 461-476, 2010.
- [61] Raciti Castelli M, Benini E, *Effect of blade inclination angle on a Darrieus wind turbine*. Turbo Expo Technical Conference, ASME, Glasgow, Scotland, UK, GT2010-23332, 2010.
- [62] D'Alessandro V, Montelpare S, Ricci R, Secchiaroli A, *Unsteady Aerodynamics of a Savonius wind rotor: A new computational approach for the simulation of energy performance*. Energy, 35 (8), pp. 3349-3363, 2010.
- [63] Castelli M.R, Ardizzon G, Battisti L, Benini E, Pavesi G, *Modeling strategy and numerical validation for a Darrieus vertical axis micro-wind turbine*. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE), 7 (PARTS A AND B), pp. 409-418, 2010.
- [64] Amet E, Maître T, Pellone C, Achard J.L, *2D numerical simulations of blade-vortex interaction in a Darrieus turbine*. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 131 (11), pp. 1111031-11110315, 2009.

- [65] Li C, Zhu S, Xu Y.L, Xiao Y, *2.5D large eddy simulation of vertical axis wind turbine in consideration of high angle of attack flow*. Renewable Energy, 51, pp. 317-330, 2013.
- [66] Rossetti A, Pavesi G, *Comparison of different numerical approaches to the study of the H-Darrieus turbines start-up*. Renewable Energy, 50, pp. 7-19, 2013.
- [67] Sun X, Wang Y, An Q, Cao Y, Wu G, Huang D, *Aerodynamic performance and characteristic of vortex structures for Darrieus wind turbine. II. the relationship between vortex structure and aerodynamic performance*. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 6 (4), 2014.
- [68] Brusca S, Lanzafame R, Messina M, *Design of a vertical-axis wind turbine: how the aspect ratio affects the turbine's performance*. International Journal of Energy and Environmental Engineering, 5 (4), pp. 333-340, 2014.
- [69] Orlandi A, Collu M, Zanforlin S, Shires A, *3D URANS analysis of a vertical axis wind turbine in skewed flow*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 147, pp. 77-84, 2015.
- [70] Lam H.F, Peng H.Y, *Study of wake characteristics of a vertical axis wind turbine by two- and three-dimensional computational fluid dynamics simulations*. Renewable Energy, 90, pp. 386-398, 2016.
- [71] Rezaeiha A, Kalkman I, Blocken, B. *CFD simulation of a vertical axis wind turbine operating at a moderate tip speed ratio: Guidelines for minimum domain size and azimuthal increment*. Renewable Energy, 107, pp. 373-385, 2017.
- [72] Balduzzi F, Drofelnik J, Bianchini A, Ferrara G, Ferrari L, *Campobasso, M.S. Darrieus wind turbine blade unsteady aerodynamics: a three-dimensional Navier-Stokes CFD assessment*. Energy, 128, pp. 550-563, 2017.
- [73] Hoerner S, Abbaszadeh S, Maître T, Cleynen O, Thévenin D, *Characteristics of the fluid–structure interaction within Darrieus water turbines with highly flexible blades*. Journal of Fluids and Structures, 88, pp. 13-30, 2019.
- [74] Battisti L, Persico G, Dossena V, Paradiso B, Raciti Castelli M., Brighenti A, Benini E. *Experimental benchmark data for H-shaped and troposkien VAWT architectures*. Renewable Energy, 125, pp. 425-444, 2018.
- [75] Reddy JN. *Mechanics of laminated composite plates and shells theory and analysis 2nd Ed.*, CRC Press, New York, USA 2004.



- 
- [76] Barbero E.J, *Finite Element Analysis of Composite Materials*, CRC Press, Taylor&Francis Group, USA, 2008.
- [77] Ochoa O.O, Reddy J.N. *Finite Element Analysis of Composite Laminates*, Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [78] Пековић О, *Изогеометријска анализа ламинираних композитних структура*. Докторска дисертација, Машински факултет Универзитета у Београду, 2014.
- [79] Barbero E.J, *Finite Element Analysis of Composite Materials using ANSYS*, CRC Press, Taylor&Francis Group, USA, 2014.
- [80] ANSYS. *ANSYS Mechanical APDL Advanced Analysis Guide*. ANSYS, Inc, Canonsburg, 2015.
- [81] ANSYS. *ANSYS Mechanical APDL Command Reference*. ANSYS, Inc, Canonsburg, 2015.
- [82] ANSYS. *ANSYS Mechanical APDL Element Reference*. ANSYS, Inc, Canonsburg, 2015.
- [83] ANSYS. *ANSYS Mechanical APDL Modeling and Meshing Guide*. ANSYS, Inc, Canonsburg, 2015.
- [84] ANSYS. *ANSYS Mechanical APDL Programmer's Reference*. ANSYS, Inc, Canonsburg, 2015.
- [85] ANSYS. *ANSYS Mechanical APDL Structural Analysis Guide*. ANSYS, Inc, Canonsburg, 2015.
- [86] ANSYS. *FE Modeler User's Guide*. ANSYS, Inc, Canonsburg, 2015.
- [87] Cox K, Echtermeyer A, *Structural design and analysis of a 10MW wind turbine blade*, Energy Procedia 24, 194 – 201, 2012.
- [88] Pabut O, et al, *Model validation and structural analysis of a small wind turbine blade*, 8th International DAAAM Baltic Conference Industrial Engineering, Tallinn, Estonia, 2012.
- [89] Griffith D.T, Ashwill T.D, *The Sandia 100-meter All-glass Baseline Wind Turbine Blade: SNL100-00*. SAND2011-3779, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 2011.

- [90] Ong C.H, Tsai S.W, *The use of carbon fibers in wind turbine blade design: A SERI-8 example*, SAND2000-0478, Sandia National Laboratories, Albuquerque, N.M, 2000.
- [91] Forcier LC, Joncas S, *Development of a structural optimization strategy for the design of next generation large thermoplastic wind turbine blades*. Struct Multidisc Optim 45:889-906, 2012.
- [92] Wu W. H, Young W. B, *Structural Analysis and Design of the Composite Wind Turbine Blade*, Appl Compos Mater, 19:247–257, 2012.
- [93] Kong C, et al. *Structural investigation of composite wind turbine blade considering various load cases and fatigue life*, Energy 30, 2101–2114, 2005.
- [94] Kong C, Bang J, Jeong S, Ryu J, Kim Y. *Structural design of medium scale composite wind turbine blade*. Proceedings of the third Asian-Pacific conference on aerospace technology and science (APCATS2000), pp. 376–84, 2000.
- [95] Amer C, Sahin M, *Structural Analysis of a Composite Wind Turbine Blade*, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering Vol:8, No:7, 2014.
- [96] Bir G, Migliore P, *Preliminary Structural Design of Composite Blades for Two- and Three-Blade Rotors*. Technical Report NREL/TP-500-31486, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 2004.
- [97] Ahmad S, Dr.Izhar-ul-Haq, *Wind Blade Material Optimization*, Advances in Mechanical Engineering, ISSN: 2160-0619 Volume 2, Number 4, December, 2012.
- [98] Thompsen O. T, *Sandwich materials for wind turbine blades-Present and future*, Journal of Sandwich Structures & Materials, Volume: 11 issue: 1, page(s): 7-26, 2009.
- [99] Kalagi G.R, *Experimental Study on Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Polymer Composite Materials for Wind Turbine Blades*, Materials Today: Proceedings 5, pp. 2588–2596, 2018.
- [100] Shah D.U, et al. *Can flax replace E-glass in structural composites? A small wind turbine blade case study*, Composites Part B: Engineering, Volume 52, pp. 172-181, 2013.
- [101] Antar E, Elkhoury M, *Parametric sizing optimization process of a casing for a Savonius Vertical Axis Wind Turbine*. Renewable Energy, pp. 127-138, 2019.

- [102] Marinić-Kragić I, Vučina D, Milas Z, *Concept of flexible vertical-axis wind turbine with numerical simulation and shape optimization*. Energy, pp. 841-852, 2019.
- [103] He D.Q, Bai H.L, Chan C.M, Li K.M, *Performance-based Optimizations on Savonius-type Vertical-axis Wind Turbines using Genetic Algorithm*. Energy Procedia, 158, pp. 643-648, 2019.
- [104] Zheng Y, Bai H.L, Chan C., *Optimization of Savonius turbine clusters using an evolutionary based Genetic Algorithm*. Energy Procedia, 158, pp. 637-642, 2019.
- [105] Zheng M, Zhang X, Zhang L, Teng H, Hu J, Hu M, *Uniform Test Method Optimum Design for Drag-Type Modified Savonius VAWTs by CFD Numerical Simulation*. Arabian Journal for Science and Engineering, 43 (9), pp. 4453-4461, 2018.
- [106] Rezaeiha A, Montazeri H, Blocken B, *Towards optimal aerodynamic design of vertical axis wind turbines: Impact of solidity and number of blades*. Energy, pp. 1129-1148, 2018.
- [107] Mirfazli S.K, Giahi M.H, Dehkordi A.J, *Numerical optimization of a vertical axis wind turbine: Case study at TMU campus*. Wind and Structures, An International Journal, 28 (3), pp. 191-201, 2019.
- [108] Meana-Fernández A, Solís-Gallego I, Fernández Oro J.M, Argüelles Díaz K.M, Velarde-Suárez S, *Parametrical evaluation of the aerodynamic performance of vertical axis wind turbines for the proposal of optimized designs*. Energy, 147, pp. 504-517, 2018.
- [109] Liang C, Li H, *Aerofoil optimization for improving the power performance of a vertical axis wind turbine using multiple streamtube model and genetic algorithm*. Royal Society Open Science, 5 (7), 2018.
- [110] Daróczy L, Janiga G, Thévenin D, *Computational fluid dynamics based shape optimization of airfoil geometry for an H-rotor using a genetic algorithm*. Engineering Optimization, 50 (9), pp. 1483-1499, 2018.
- [111] De Tavernier D, Ferreira C, van Bussel G, *Airfoil optimisation for vertical-axis wind turbines with variable pitch*. Wind Energy, 22 (4), pp. 547-562, 2019.

- [112] Zitouni Z, Hamid M, Marjani A.E, *Optimization of Darrieus- Type Straight - Bladed Vertical Axis Wind Turbines*. Proceedings of 2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2017, 2018.
- [113] Li C, Xiao Y, Xu Y.L, Peng,Y.X, Hu G, Zhu S, *Optimization of blade pitch in H-rotor vertical axis wind turbines through computational fluid dynamics simulations*. Applied Energy, 212, pp. 1107-1125, 2018.
- [114] Bešlagić E, Varda K, Petković D, *Geometry optimization of small helicoid VAWT rotor*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 393 (1), 2018.
- [115] Cao H, Wu X, Ye H, Hu S, Lu L, Peng J, *Optimization Research on Lift-Type Vertical Axis Wind Turbine Airfoil by CFD*. Journal of Physics: Conference Series, 1064 (1), 2018.
- [116] Ma N, Lei H, Han Z, Zhou D, Bao Y, Zhang K, Zhou L, Chen C, *Airfoil optimization to improve power performance of a high-solidity vertical axis wind turbine at a moderate tip speed ratio*. Energy, 150, pp. 236-252, 2018.
- [117] Liang C, Li H, *Effects of optimized airfoil on vertical axis wind turbine aerodynamic performance*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 40 (2), 2018.
- [118] Nguyen L, Metzger M, *Optimization of a vertical axis wind turbine for application in an urban/suburban area*. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 9 (4), 2017.
- [119] Ferdoues M.S, Ebrahimi S, Vijayaraghavan K, *Multi-objective optimization of the design and operating point of a new external axis wind turbine*. Energy, 125, pp. 643-653, 2017.
- [120] Tahani M, Babayan N, Mehrnia S, Shadmehri M, *A novel heuristic method for optimization of straight blade vertical axis wind turbine*. Energy Conversion and Management, 127, pp. 461-476, 2016.
- [121] Wang L, Kolios A, Nishino T, Delafin P.L, Bird T. *Structural optimisation of vertical-axis wind turbine composite blades based on finite element analysis and genetic algorithm*. Composite Structures, 153, pp. 123-138, 2016.
- [122] Rajad O, Hamid M, Fertah S.D, El Maqani, A, *Fiber orientation effect on the behavior of the composite materials of the horizontal axis wind turbine blade*

- (*HAWTB*). Proceedings of 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2018, art. no. 8702930. 2019.
- [123] Nikbakt S, Kamarian S, Shakeri M, *A review on optimization of composite structures Part I: Laminated composites*. Composite Structures, 195, pp. 158-185, 2018.
- [124] Albanesi A, Roman N, Bre F, Fachinotti V, *A metamodel-based optimization approach to reduce the weight of composite laminated wind turbine blades*. Composite Structures, 194, pp. 345-356, 2018.
- [125] Albanesi A, Bre F, Fachinotti V, Gebhardt C, *Simultaneous ply-order, ply-number and ply-drop optimization of laminate wind turbine blades using the inverse finite element method*. Composite Structures, 184, pp. 894-903, 2018.
- [126] Kim J.S, Kim C.G, Hong C.S, *Optimum design of composite structures with ply drop using genetic algorithm and expert system shell*. Composite Structures, 46 (2), pp. 171-187, 1999.
- [127] Irisarri F.X, Lasseigne A, Leroy F.H, Le Riche R, *Optimal design of laminated composite structures with ply drops using stacking sequence tables*. Composite Structures, 107, pp. 559-569, 2014.
- [128] Fan H.T, Wang H, Chen X.H, *An optimization method for composite structures with ply-drops*. Composite Structures, 136, pp. 650-661, 2016.
- [129] Fagan E.M, Flanagan M, Leen S.B, Flanagan T, Doyle A, Goggins J, *Physical experimental static testing and structural design optimisation for a composite wind turbine blade*. Composite Structures, 164, pp. 90-103, 2017.
- [130] Dal Monte A, De Betta S, Raciti Castelli, M, Benini E, *Proposal for a coupled aerodynamic–structural wind turbine blade optimization*. Composite Structures, 159, pp. 144-156, 2017.
- [131] Alhamaly A.S, Saeed F, Sahin A.Z, *Coupled aerodynamic and structural optimization of multi-megawatt VAWT using MATLAB*. AIAA SciTech Forum, Wind Energy Symposium, 2018.
- [132] Maheri A, *Multiobjective optimisation and integrated design of wind turbine blades using WTBM-ANSYS for high fidelity structural analysis*. Renewable Energy, 145, pp. 814-834, 2020.

- [133] Rao S.S, *Engineering Optimization: Theory and Practice*, John Wiley & Sons, 2009.
- [134] Deb K, *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, John Wiley & Sons, 2001.
- [135] Eberhart RC, Kennedy J, *A new optimizer using particle swarm theory*. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micromachine and Human Science, Nagoya, Japan, pp 39-43, 1995.
- [136] Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. *A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II*. IEEE Trans Evol Comput 6(2):182-197, 2002.
- [137] Chowdhury S, Tong W, Messac A, Zhang J. *A mixed-discrete Particle Swarm Optimization algorithm with explicit diversity-preservation*. Struct Multidisc Optim 47:367-388, 2013.
- [138] Постельник З, Ступар С, Сворцан Ј, Пековић О, Иванов Т, *Multi-objective design optimization strategies for small-scale vertical-axis wind turbines*, Structural and Multidisciplinary Optimization, vol.53, pp.277-290, 2016.
- [139] Selig M.S, Donovan J.F, Fraser D.B, *Airfoils at Low Speeds*, SoarTech Publications, Virginia Beach, Va, 1989.
- [140] Selig M.S, McGranahan B.D, *Wind tunnel aerodynamic tests of six airfoils for use on small wind turbines*. NREL/SR-500-34515, 2004.
- [141] Sheldahl R.E, Klimas P.C, *Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines*. SAND80-2114, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 1981.
- [142] Peng Y-X, Xu Y-L, Zhan S, Shum K-M, *High-solidity straight-bladed vertical axis wind turbine: Aerodynamic force measurements*. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics 184, pp. 34-48, 2019.
- [143] Howell R, et al, *Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine*, Renewable Energy, V(35) 2, pp. 412-422, 2010.
- [144] Dodd H.H, et al, *Test results and status of the DOE/Sandia 34-m VAWT test bed*, Proceedings of the Canadian wind energy association conference, Sandia National Laboratories, 1989.

- [145] Danao L.A, Eboibi O, Howell R, *An experimental investigation into the influence of unsteady wind on the performance of a vertical axis wind turbine*. Applied Energy 107: 403-411, 2013.
- [146] Deglaire P. et al, *Experimental results from a 12kW vertical axis wind turbine with a direct driven PM synchronous generator*. Proceedings of EWEC 2007, Milano, 2007.
- [147] Edwards J.M, Danao L.A, Howell R.J, *Novel Experimental Power Curve Determination and Computational Methods for the Performance Analysis of Vertical Axis Wind Turbines*. Journal of Solar Energy Engineering 134 031008: 1-11, 2012.
- [148] Kooiman S.J, Tullis S.W, *Response of a Vertical Axis Wind Turbine to Time Varying Wind Conditions found within the Urban Environment*, Wind Engineering 34: 389-401, 2010.
- [149] Pourrajabian A, et al, *Aero-structural design and optimization of a small wind turbine blade*, Renewable Energy, 87 (2), pp.837-848, 2016.
- [150] Секуловић М, *Метод коначних елемената*, Грађевинска књига, Београд, 1988
- [151] E. Carrera, *Theories and Finite Elements for Multilayered, Anisotropic, Composite Plates and Shells*, Arch. Comput. Meth. Engng., 9 (2), 87-140, 2002
- [152] Zhang YX, Yang CH, *Recent developments in finite element analysis for laminated composite plates*. Compos.Struct, 88, 147–157, 2009.
- [153] Akhras G, Cheung M.S, Li W, *Static and vibrations analysis of anisotropic laminated plates by finite strip method*, International Journal of Solids and Structures, 30(22), 3129–3137, 1993.
- [154] Peeters J, Vandepitte D, Sas P, *Structural analysis of a wind turbine and its drive train using the flexible multibody simulation technique*, Proceedings of ISMA, Belgium, 2006.
- [155] Bechly M, Clausent P, *Structural design of a composite wind turbine blade using finite element analysis*, Computers & Structures vol.63, no.3, p.639-646, 1997.
- [156] Zhong-Jia Y. et al. *Design and Analysis of Small-Scale Lift-Type Vertical-Axis Wind Turbine Using Composite Blade*, Polymers & Polymer Composites 22(4):423-430, 2014.
- [157] Sheldahl R.E, Blackwell B.F, *Free-Air Performance Tests of a 5-Metre-*

- Diameter Darrieus Turbine*. SAND77-1063, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 1977.
- [158] Yang J, Peng, C, Xiao J, Zeng J, Xing S, Jin J, Deng H. *Structural investigation of composite wind turbine blade considering structural collapse in full-scale static tests*. Compos. Struct. 97, 15–29. 2013.
- [159] Bulow F. *A Generator Perspective on Vertical Axis Wind Turbines*. Uppsala University, Uppsala, 2013.
- [160] Danao L.A, Eboibi O, Howell R, *An experimental investigation into the influence of unsteady wind on the performance of a vertical axis wind turbine*. Applied Energy 107: 403-411, 2013.
- [161] Живановић М, *Мерни мостови*, Семинарски рад, Машински факултет, Београд, 2004.
- [162] Грбовић А, *Истраживање заморног века носећих структурних елемената израђених од суперлегура*, докторска дисертација Машински факултет Универзитета у Београду, 2012.
- [163] Зорић, Н, *Динамичко понашање паметних танкозидних композитних структура*, докторска дисертација, Машински факултет Универзитета у Београду, 2013.
- [164] Митровић Н, *Напони и деформације структура комплексне геометрије цевоводне арматуре*, докторска дисертација, Машински факултет Универзитета у Београду, 2013.
- [165] Балтић М, *Утицај оштећења на динамичке карактеристике композитних лопатица ротора ветротурбина*, Машински факултет Универзитета у Београду, 2018.
- [166] Митровић Н, et al. *Примена методе корелације дигиталних слика на опрему под притиском (digital image correlation-DIC)*, Монографија, Машински факултет Универзитета у Београду, 2017.
- [167] GOM mbh, *PONTOS/ARAMIS HighSpeed PHOTRON SAI User Information*, D-38106 Braunschweig, Germany, 2008.
- [168] GOM mbh, *ARAMIS v6.3 and higher User Manual-Software*, D-38106 Braunschweig, Germany, 2013.
- [169] Peters H, Ranson F, *Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis*,



- Optical Engineering, vol 21, 427, 1981.
- [170] Балтић М, Сворцан Ј, Перић Б. ет ал. *Comparative numerical and experimental investigation of static and dynamic characteristics of composite plates*, Journal of Mechanical Science and Technology, 33: 2597, 2019.
- [171] Hild F, Roux S, *Comparison of local and global approaches to digital image correlation*, Experimental Mechanics, vol.52, no. 9 p. 1503-1519, 2012.
- [172] Fathi A, Keller J, Altstaedt V, *Full-field shear analyses of sandwich core materials using Digital Image Correlation (DIC)*, Composites: Part B, vol.70 p.156-166, 2015.
- [173] ANSYS. (2015) *ANSYS Fluent Theory Guide*. ANSYS, Inc, Canonsburg.
- [174] ANSYS. (2015) *ANSYS Fluent User's Guide*. ANSYS, Inc, Canonsburg.
- [175] ANSYS. (2015) *Workbench Scripting Guide*. ANSYS, Inc, Canonsburg.
- [176] ANSYS. (2015) *ANSYS Meshing User's Guide*. ANSYS, Inc, Canonsburg.
- [177] Menter, F.R, *Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications*, AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605, 1994.
- [178] *Single and Dual-Supply, Rail-to-Rail, Low Cost Instrumentation Amplifier – AD623 Data Sheet*. One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.Tel: 781.329.4700
- [179] Ramanathan A.K, ет ал. *Near DC force measurement using PVDF sensors*. Proc. of SPIE Vol. 10602 106020M-1, 2018.

# Прилог А

## Скрипт за спровођење трокритеријумске ОПТИМИЗАЦИЈЕ КОМПОЗИТНЕ ЛОПАТИЦЕ

```
% VAWT strukturna optimizacija, sa ogranicenjima
% 4 ulaza: redjanje kompozita [teta1_np1/teta2_np2/teta1_np1]
% vrsi optimizaciju za 4 izlazna parametra i ogranicenja:
% max pomeranje struk, ukupnu masu, max(Tsai-Wu) i max(d|f-wnom/2/pi|)
% ovde: min(masa), min(pomeranje) i max(d|f-wnom/2/pi|)
clear all, close all, clc

% Optimizacija: klasicni PSO (za razliku od linearnog)
% pomocne promenljive
omega = .6;
c1 = 2.;
c2 = 2.;
c3 = 2.;          % opciono

% granice domena koji se pretrazuje
npmin = 1;      npmax = 20;
tetamin = 0;    tetamax = 75;
ggr = [npmin tetamin npmin tetamin];
dgr = [npmax tetamax npmax tetamax];
% minimalna brzina, komponente
vmin = [1 15 1 15];
Vnom = 8;
ro = 1.225;
wnom = 200*pi/30;
% potrebna razlika sopstvenih frek i ug.brzine rotora, u [Hz]
dfrekgr = 0.5;

% granicna verovatnoca za "craziness"
Pcr = 0.01;

% broj jedinki u populaciji
M = 100;
% broj "vremenskih" koraka
N = 25;
% broj osobina/parametara - 4(ulazna) + 3(izlazna)
m = 4;

% ispis rezultata
fid = fopen('jedinke.txt', 'w');
fclose(fid);
```

```
% matrice trenutnih poloazaja (M x m+3+1), brzina (M x m)
jedinke = zeros(M,m+4);
brzine = zeros(M,m);
arhiva = [];

% pocetni poloazaj i brzine, slucajni
for i = 1:M
    % definisi cesticu
    [np1, teta1, np2, teta2] = cestica;
    jedinke(i,1:m) = [np1, teta1, np2, teta2];

    % proracun za jednu jedinku
    [mass, defmax, tsaiwu, dfrek, frek] = ...
        radiJedinku(np1,teta1,np2,teta2);

    jedinke(i,m+1) = mass;        % min(mass)
    jedinke(i,m+2) = defmax;     % min(defmax)
    jedinke(i,m+3) = -dfrek;    % max(dfrek) (- za max)
    % constraint violation
    jedinke(i,m+4) = ogr3(mass, defmax, 1000, tsaiwu, dfrek, dfrekgr);

    % slucajne pocetne brzine
    brzine(i,:) = [(0.5-rand)*(npmax-npmin), (0.5-rand)*...
        (tetamax-tetamin), (0.5-rand)*(npmax-npmin), ...
        (0.5-rand)*(tetamax-tetamin)];
    % ispis - belezenje rezultata
    fid = fopen('jedinke.txt', 'a');
    fprintf(fid, '%i %i %i %i %8.4f %8.4f %8.4f %8.4f\r\n', ...
        jedinke(i,1), jedinke(i,2), jedinke(i,3), jedinke(i,4), ...
        jedinke(i,5), jedinke(i,6), jedinke(i,7), jedinke(i,8));
    fclose(fid);
end
% lokalni minimumi
lokmin = jedinke;
% globalni minimumi se sad beleze u arhivu
arh3_c(jedinke, arhiva, m);
clear arhiva;
load arhiva.txt;
save('arh0.txt', 'arhiva', '-ASCII');

% Proracun - sledeci vremenski trenuci
for j = 1:N
    % slucajni izbor globalnog optimuma jer su sve cestice
    % iz Pareto-fronta ravnopravne
    globmin = arhiva(randi(size(arhiva,1)),:);

    for i = 1:M
        % pretpostavka novih brzina
        for k = 1:m
            % klasicni PSO
            % dodat clan - diversity preservation term
            r1 = rand;
            r2 = rand;
            r3 = rand;
            brzine(i,k) = omega*brzine(i,k) + c1*r1*...
                (lokmin(i,k)-jedinke(i,k)) + ...
```

```

        (c2*r2-c3*r3)*(globmin(k)-jedinke(i,k));
% ogranicenje brzine
if (brzine(i,k)>0)
    brzine(i,k) = min(brzine(i,k),ggr(k)-jedinke(i,k));
    brzine(i,k) = max(brzine(i,k),vmin(k));
else
    brzine(i,k) = max(brzine(i,k),dgr(k)-jedinke(i,k));
    brzine(i,k) = min(brzine(i,k),-vmin(k));
end
end

% novi poloazaji
jedinke(i,1:m) = jedinke(i,1:m) + brzine(i,:);
% dodatak, da budu vrednosti koje odgovaraju
% zadatim koracima i u zadatim granicama
jedinke(i,1) = min(max(round(jedinke(i,1)),npmin),npmax);
jedinke(i,2) = min(max(round(jedinke(i,2)/15)*15,...
    tetamin),tetamax);
jedinke(i,3) = min(max(round(jedinke(i,3)),npmin),npmax);
jedinke(i,4) = min(max(round(jedinke(i,4)/15)*15,...
    tetamin),tetamax);

% "craziness"
if (rand<Pcr)
    [np1, teta1, np2, teta2] = cestica;
    jedinke(i,1:m) = [np1, teta1, np2, teta2];
    brzine(i,:) = [(0.5-rand)*(npmax-npmin),(0.5-rand)*...
        (tetamax-tetamin),(0.5-rand)*(npmax-npmin),...
        (0.5-rand)*(tetamax-tetamin)];
end

% novi proracun za jednu jedinku
np1 = jedinke(i,1);
teta1 = jedinke(i,2);
np2 = jedinke(i,3);
teta2 = jedinke(i,4);
[mass, defmax, tsaiwu, dfrek, frek] = ...
    radiJedinku(np1,teta1,np2,teta2);

jedinke(i,m+1) = mass;           % min(mass)
jedinke(i,m+2) = defmax;       % min(defmax)
jedinke(i,m+3) = -dfrek;       % max(dfrek) (- za max)
% constraint violation - krsenje ogranicenja
jedinke(i,m+4) = ogr3(mass, defmax, 1000, tsaiwu, ...
    dfrek, dfrekgr);

% novi individualni minimumi
% oba "feasible"
if (~jedinke(i,m+4) && ~lokmin(i,m+4))
    if (dom(jedinke(i,m+1:m+3),lokmin(i,m+1:m+3))==3)
        lokmin(i,:) = jedinke(i,:);
    end
% "feasible" je samo nova cestica
else if (~jedinke(i,m+4))
    lokmin(i,:) = jedinke(i,:);
% nijedna nije "feasible", pa ona koja manje krsi ogranicenja
else if (jedinke(i,m+4)<lokmin(i,m+4))
    lokmin(i,:) = jedinke(i,:);
end

```

```
        end
    end
end

% ispis - belezenje rezultata
fid = fopen('jedinke.txt', 'a');
fprintf(fid, '%i %i %i %i %8.4f %8.4f %8.4f %8.4f\r\n', ...
        jedinke(i,1), jedinke(i,2), jedinke(i,3), jedinke(i,4),
...
        jedinke(i,5), jedinke(i,6), jedinke(i,7), jedinke(i,8));
fclose(fid);
end
% novi globalni minimumi
arh3_c(jedinke, arhiva, m);
clear arhiva;
load arhiva.txt;
% za proveru konvergencije
save(sprintf('arh%i.txt',j), 'arhiva', '-ASCII');
end

% prikaz rezultata
clear jedinke;
load jedinke.txt;
dn = 0.99/N;

figure
plot3(jedinke(:,m+1),jedinke(:,m+2),-jedinke(:,m+3),'o',...
      'MarkerFaceColor','y','MarkerSize',3)
hold on, plot3(arhiva(:,m+1),arhiva(:,m+2),-arhiva(:,m+3),'s',...
      'MarkerFaceColor','y')
axis([0 3 0 5 0 1])
view(-60,40)
xlabel('m [kg]')
ylabel('u_{tip} [mm]')
zlabel('\Delta\nu [Hz]')
legend('Dominirana resenja', 'Pareto front', 'Location', 'NorthEast')
grid on, set(gca, 'fontsize', 14)

% cuvanje podataka
save('jedinke.txt', 'jedinke', '-ASCII');
save('arhiva.txt', 'arhiva', '-ASCII');
```

# Прилог Б

## Функција за спровођење структуралног прорачуна једне КОМПОЗИТНЕ ЛОПАТИЦЕ

```
% funkcija za strukturni proracun
% geometrijski ulaz konstantan! (lopatice je bez ramenjace)
% nominalna brzina vetra Vnom [m/s], nom. ugaona brzina wnom [rad/s],
% broj slojeva materijala (np1) orijentacije 1 (teta1),
% broj slojeva materijala (np2) orijentacije 2 (teta2),
% pretpostavljena struktura kompozita [teta1_np1/teta2_np2/teta1_np1]
% izlaz: masa lopatice u [kg],
% max deformacija po celoj lopatici u [mm],
% max Tsai-Wu po celoj lopatici,
% min. razlika prva 3 moda oscilovanja i frek. rotacije u [Hz],
% prvih 5 sopstvenih frekvencija [Hz]
% primer poziva:
% [mass, defmax, tsaiwu, dfrek, frek] = radiJedinku(5, 45, 10, 0)

function [mass, defmax, tsaiwu, dfrek, frek] = ...
    radiJedinku(np1, teta1, np2, teta2)

% ULAZ
% opsti parametri, isti za sve
N = 3; % broj lopatica
r = 1500; % poluprecnik, u [mm]
sig = 0.30; % koef. ispune, sig = Nb*c/R
c = sig*r/1000/N; % tetiva, u [m]
L = 1000; % visina/duzina, u [mm]
wnom = 200*pi/30; % nominalna ugaona brzina, [RPM -> rad/s]
nu = wnom/2/pi; % frekvencija, [Hz]

% max sile na Vo = 18 m/s
Fy = 67.0/4; % [N], 1/4 ukupne sile
Fz = -252.0/4; % [N], 1/4 ukupne sile

% strukturni proracun
% pravi ulazni fajl
fid = fopen('ulazP.txt','w');
fprintf(fid, '/TITLE, lopatica\n');
fprintf(fid, '/UNITS, MPA !Jedinice: mm, MPa and N\n\n');
fprintf(fid, '/PREP7 ! Preprocesor\n');
fprintf(fid, '!Ulazne promenljive\n');
fprintf(fid, 'c = %6.2f ! tetiva [mm]\n', c*1000);
fprintf(fid, 'L = %i ! duzina [mm]\n', L);
```

```
fprintf(fid, 'r = %i                ! poluprecnik [mm]\n', r);
fprintf(fid, 'Fy = %8.4f            ! tan. sila po cvoru [N]\n', Fy);
fprintf(fid, 'Fz = %8.4f            ! nor. sila po cvoru [N]\n', Fz);
fprintf(fid, 'om = %6.2f            ! ugaona brzina [rad/s]\n', wnom);
% dodatak za mrezu
dx = 10;                          % poduzna duzina elementa, u [mm]
fprintf(fid, 'dx = %8.4f! duzina poduznih elemenata mreze [-]\n', dx);
% redjanje slojeva kompozita (orijentacije + broj slojeva)
fprintf(fid, 't1 = 0.1             ! debljina sloja kompozita [mm]\n');
fprintf(fid, 'np1 = %i             ! broj slojeva pod uglom 1\n', np1);
fprintf(fid, 'teta1 = %i           ! orijentacija platna 1\n', teta1);
fprintf(fid, 'np2 = %i             ! broj slojeva pod uglom 2\n', np2);
fprintf(fid, 'teta2 = %i           ! orijentacija platna 2\n', teta2);
fclose(fid);

% spoji fajlove
dos('copy ulazP.txt + proracun.txt radi.txt');
% izvrsava strukturni proracun
!run_ansys.bat

% brise nepotrebne fajlove
delete('file.BCS');
delete('file.db');
delete('file.err');
delete('file.esav');
delete('file.full');
delete('file.log');
delete('file.mlv');
delete('file.mntr');
delete('file.mode');
delete('file.rst');
delete('file.stat');
delete('lop.anf');
delete('lop.ans_log');
delete('lop.log');
delete('prl.out');
delete('radi.txt');
delete('ulazP.txt');

% cita rezultate
fid = fopen('rez.txt');
tline = fgetl(fid);                % cita prvu praznu liniju
tline = fgetl(fid);                % cita liniju 'REZ:'
tline = fgetl(fid);                % cita podatke
A = sscanf(tline, ...
           '%*s %f %*s %f %*s %f %*s %f %*s %f %*s %f %*s %f %*s %f');
fclose(fid);
delete('rez.txt');

frek = A(1:5);
dfrek = min([min(abs(frek-nu)), min(abs(frek-2*nu)), ...
            min(abs(frek-3*nu))]);
mass = A(6);
defmax = A(7);
tsaiwu = A(8);

end
```

# Прилог В

## Помоћни документ за спровођење структуралног прорачуна једне композитне лопатице

```
g = 9.81           ! ubrzanje zemljine teze [m/s^2]
a = om*om*r/1000  ! centrifugalno ubrzanje [m/s^2]

! izlazni parametri
*DMAT,rez,d,alloc,1,8

! Karakteristike materijala
uimp,1,ex,ey,ez,17.72E3,17.72E3,17.72E3      ! BIAx
uimp,1,gxy,gyz,gxz,2.47E3,2.47E3,2.47E3
uimp,1,prxy,pryz,prxz,0.25,0.25,0.25
mp,dens,1,1.737e-6

ET,1,SHELL181,,,2           ! element SHELL181

SECTYPE,1,SHELL,,La1       ! br.#1, [teta1/teta2/teta1], label = La1
SECDATA, np1*t1,1,teta1,3   ! 1. sloj: mat.#1, teta1, deb = np1*t1
[mm]
SECDATA, np2*t1,1,teta2,3
SECDATA, np1*t1,1,teta1,3
SECOFFSET,MID              ! Cvorovi na sredini laminata

! Geometrija, uvoz
~CATIAIN,'lop','model',,,,0 ! CATIA model
AGLUE,all                  ! Slepri sve povrshine

! Mreza
LOCAL,11,0,,,0,0,0        ! lokalni koordinatni sistemi
LESIZE,ALL,dx,            ! po svim ivicama
AESIZE,ALL,dx,            ! i po svim povrshinama
! tip elementa, 0 znaci cetvorouglovi po 2d geometriji
MSHAPE,0,2D
! slobodno 0 ili mapirano 1 pravljenje mreze
MSHKEY,0

ESYS,11
SECNUM,1                  ! redjanje
AMESH,all                 ! pravi mrezu po svim povrshinama

CSYS,0
```



---

```
!/PSYMB,esys,1          ! crta orijentaciju elemenata mreze
!EPLOT
FINISH                  ! Izlaz iz preprocesora

/SOLU                  ! Resenje
ANTYPE,MODAL          ! Tip analize - modalna
D,27,all,0            ! Ukljestenje, u cvorovima 1. cetvrtine
D,178,all,0
D,683,all,0
D,784,all,0
D,885,all,0
D,1087,all,0
D,987,all,0
D,1897,all,0
D,1898,all,0
D,1899,all,0
D,1900,all,0
D,1901,all,0
D,1902,all,0
D,1903,all,0
D,1904,all,0
D,1905,all,0
D,1197,all,0
D,2299,all,0
D,2199,all,0
D,2400,all,0
D,2501,all,0
D,330,all,0
D,431,all,0

D,77,all,0            ! Ukljestenje, u cvorovima 3. cetvrtine
D,128,all,0
D,633,all,0
D,734,all,0
D,835,all,0
D,1037,all,0
D,937,all,0
D,1447,all,0
D,1448,all,0
D,1449,all,0
D,1450,all,0
D,1451,all,0
D,1452,all,0
D,1453,all,0
D,1454,all,0
D,1455,all,0
D,1147,all,0
D,2249,all,0
D,2149,all,0
D,2350,all,0
D,2451,all,0
D,380,all,0
D,481,all,0

MODEPT,LANB,5
EQSLV,SPAR
MXPAND,5, , ,0
LUMPM,0
```

```
PSTRES,0
MODOPT,LANB,5,0,0, ,OFF
SOLVE
*GET,P1,MODE,1,FREQ      ! Prvi mod oscilovanja
rez(1,1)=P1
*GET,P1,MODE,2,FREQ      ! Drugi mod oscilovanja
rez(1,2)=P1
*GET,P1,MODE,3,FREQ      ! Treci mod oscilovanja
rez(1,3)=P1
*GET,P1,MODE,4,FREQ      ! Cetvrti mod oscilovanja
rez(1,4)=P1
*GET,P1,MODE,5,FREQ      ! Peti mod oscilovanja
rez(1,5)=P1
LSCLEAR,all
FINISH                    ! Izadji

*GET,P1,ELEM,,MTOT,X     ! ukupna masa lopatice
rez(1,6)=P1

/PREP7                    ! Preprocesor
! Konstante
m = rez(1,6)
Fx = -1.35*g*m/4
Fc = -1.25*a*m/4

/SOLU                     ! Resenje
ANTYPE,STATIC             ! Tip analize - staticka
D,27,all,0                ! Ukljestenje, u cvorovima 1. cetvrtine
D,178,all,0
D,683,all,0
D,784,all,0
D,885,all,0
D,1087,all,0
D,987,all,0
D,1897,all,0
D,1898,all,0
D,1899,all,0
D,1900,all,0
D,1901,all,0
D,1902,all,0
D,1903,all,0
D,1904,all,0
D,1905,all,0
D,1197,all,0
D,2299,all,0
D,2199,all,0
D,2400,all,0
D,2501,all,0
D,330,all,0
D,431,all,0

D,77,all,0                ! Ukljestenje, u cvorovima 3. cetvrtine
D,128,all,0
D,633,all,0
D,734,all,0
D,835,all,0
D,1037,all,0
D,937,all,0
```

```
D,1447,all,0
D,1448,all,0
D,1449,all,0
D,1450,all,0
D,1451,all,0
D,1452,all,0
D,1453,all,0
D,1454,all,0
D,1455,all,0
D,1147,all,0
D,2249,all,0
D,2149,all,0
D,2350,all,0
D,2451,all,0
D,380,all,0
D,481,all,0

F,3924,FX,Fx          ! sila u cvoru, u [N]
F,3699,FX,Fx
F,3483,FX,Fx
F,3258,FX,Fx

F,3924,FY,Fy          ! sila u tacki, u [N]
F,3699,FY,Fy
F,3483,FY,Fy
F,3258,FY,Fy

F,3924,FZ,Fz+Fc       ! sila u tacki, u [N]
F,3699,FZ,Fz+Fc
F,3483,FZ,Fz+Fc
F,3258,FZ,Fz+Fc

SOLVE                 ! Resi

/POST1
NSORT,U,SUM
*GET,P1,SORT,0,MAX     ! Maksimalno pomeranje, [mm]
rez(1,7)=P1

! dodatak za Failure criteria
RSYS, SOLU             ! Show results in 'solution' reference system
! Failure criteria definition, mat.1 - BIAX
FC,1,s,xten, 310.0
FC,1,s,xcmp, -280.0
FC,1,s,yten, 310.0
FC,1,s,ycmp, -280.0
FC,1,s,zten, 1e9
FC,1,s,xy, 10.0
FC,1,s,yz, 1e9
FC,1,s,xz, 1e9
FC,1,s,XYCP, -1
FC,1,s,YZCP, -1
FC,1,s,XZCP, -1

LAYER,0
NSORT,FAIL,TWSR       ! Tsai-Wu criterion, moze i SMAX - Max. Stress
*GET,P1,SORT,0,MAX     ! Maksimalni kriterijum loma, [mm]
```

```
rez(1,8)=P1
```

```
/SOLU  
LSCLEAR,all  
FINISH ! Izadji
```

```
*PRINT,rez,rez.txt
```

```
FINISH
```

# Биографија

Зорана Тривковић (рођ. Постељник) је рођена 20. децембра 1986. године у Београду, где је завршила основну школу и Прву београдску гимназију, природно-математички смер. Машински факултет Универзитета у Београду уписала је школске 2005/2006. године. Основне академске студије на Машинском факултету завршила је септембра 2008. године са просечном оценом 8.37, одбравивши завршни (B.Sc.) рад под називом: „Пројектовање и прорачун структуре носеће конструкције ветротурбине“ са оценом 10. Дипломске академске студије завршила је јуна 2010. године на Одсеку за ваздухопловство са просечном оценом 9.45 и оценом 10 за одбрањени дипломски (M.Sc.) рад: „Нумеричка анализа чврстоће композитних структура“. У току студија била је награђивана као један од најбољих студената - школске 2008/2009. и 2009/2010. године. Докторске академске студије уписала је школске 2010/2011. године на Машинском факултету Универзитета у Београду на Катедри за ваздухопловство. Од јануара 2011. до новембра 2018. године била запослена на Машинском факултету у Београду, на Катедри за ваздухопловство у звању истраживач-приправник као учесник на пројекту који је финансиран од стране Министарства за просвету, науку и технолошки развој Републике Србије - ТР 35035 „Истраживање и развој савремених приступа пројектовању композитних лопатица ротора високих перформанси“. Марта 2014. изабрана је у звање истраживач-сарадник. У оквиру програма Основних и Мастер академских студија била је ангажована на припреми и извођењу лабораторијских и аудиторних вежби из предмета Ветротурбине 1 и Ветротурбине 2 у току школске 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013 и 2013/2014 године, као и из предмета Пројектовање летелица у току школске 2013/2014. Такође је, у сарадњи са предметним професором, учествовала у реализацији више завршних (B.Sc.) радова из предмета Ветротурбине 1. Течно говори енглески језик, а служи се и руским језиком. Оспособљена је за рад на рачунару под оперативним системима Windows и Linux. Успешно се служи следећим програмским језицима: FORTRAN, Pascal, VBScript, C/C++, Python, и софтверским пакетима: CATIA, AutoCAD, MATLAB, ANSYS, OpenFOAM, PATRAN/NASTRAN. Удата је и има двоје деце.

## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Зорана Б. Тривковић

Број индекса: Д50/10

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКА ОПТИМИЗАЦИЈА КОМПОЗИТНИХ ЛОПАТИЦА  
ВЕТРОТУРБИНА

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршила ауторска права и користила интелектуалну својину других лица.

**Потпис аутора**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Зорана Б. Тривковић

Број индекса: Д50/10

Студијски програм: Докторске академске студије

Наслов рада: Вишекритеријумска оптимизација композитних лопатица  
ветротурбина

Ментор: доц. др Огњен Пековић

Потоисани/а: Зорана Б. Тривковић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива 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 аутора**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

### **ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКА ОПТИМИЗАЦИЈА КОМПОЗИТНИХ ЛОПАТИЦА ВЕТРОТУРБИНА**

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предала сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучила.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.  
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

**Потпис аутора**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



1. **Ауторство.** Дозвољаваате 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.** Дозвољаваате 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 прерада.** Дозвољаваате 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.** Дозвољаваате 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 прерада.** Дозвољаваате 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.** Дозвољаваате 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.