

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Марија З. Балтић

**УТИЦАЈ ОШТЕЋЕЊА НА ДИНАМИЧКЕ
КАРАКТЕРИСТИКЕ КОМПОЗИТНИХ
ЛОПАТИЦА РОТОРА ВЕТРОТУРБИНА**

докторска дисертација

Београд, 2018.

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Marija Z. Baltić

**IMPACT OF DAMAGE ON DYNAMIC
CHARACTERISTICS OF COMPOSITE WIND
TURBINE BLADES**

doctoral dissertation

Belgrade, 2018.

Комисија за преглед и одбрану:

Ментор: Др Слободан Ступар, редовни професор у пензији
Универзитет у Београду, Машински факултет

Чланови Комисије: Др Александар Симоновић, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

Др Александар Грбовић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

Др Огњен Пековић, доцент
Универзитет у Београду, Машински факултет

Др Слободан Гвозденовић, редовни професор
Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет

Датум одбране:

Утицај оштећења на динамичке карактеристике композитних лопатица ротора ветротурбина

Резиме

Истраживање у оквиру дисертације засновано је на утврђивању веза између динамичких и физичких својстава композитних структура у случају промена у структури, односно појаве оштећења и других дефеката који утичу на функционалност и интегритет конструкције. У оквиру истраживања било је потребно на основу експерименталних резултата и нумеричких анализа применом методе коначних елемената композитне структуре у иницијалном стању и са унапред дефинисаном променом (у виду зареза) извршити процену утицаја оштећења на динамичке карактеристике дела. На основу упоредних резултата експерименталног и нумеричког приступа, описана је дискусија остварених резултата на основу које се може предложити евентуална модификација система у циљу боље функционалности и исправности читаве конструкције. Истраживање у овој тези је мотивисано великим предностима које DIC поступак (метод дигиталне корелације слика) има у односу на конвенционалне методе експерименталног испитивања, посебно у формирању алгоритма за праћење понашања композитних структура. Развијена је сопствена методологија експерименталног испитивања фреквентних карактеристика при чему је формирана и сопствена, помоћна лабораторијска инсталација за извођење експеримента. Испитани су узорци сегмента рамењаче композитне лопатице пре и након задатог оштећења (6 плоча карбон-епоксидног састава, али са различитом оријентацијом слојева за сваки тип плоче). Израчунате су вредности сопствених фреквенција свих плоча пре и након оштећења при чему су развијени сопствени кодови за целокупну допунску анализу резултата. Нумерички прорачун је изведен методом коначних елемената у програмском пакету ANSYS, а вредности сопствених фреквенција одређене у

модулу модалне анализе и приказани су облици добијених модова осциловања и вредности сопствених фреквенција. Након тога је спроведена упоредна анализа експерименталних и нумеричких резултата, при чему је утврђено да је релативно одступање мање од 5% код нижих модова, који су од интереса и инжењерској примени. У циљу алтернативне провере исправности као и додатног нивоа примене DIC методе, плоче су изложене статичком оптерећењу где је извршена процена валидације вредности савојних крутости и модула еластичности и описан утицај нехомогености композитних ламината на понашање плоча. Добијени експериментални резултати током истраживања валидирају примењени поступак и развијену методологију у овој дисертацији, те се очекује успешна примена и код паметних композитних структура, што може бити правац будућег истраживања.

Кључне речи: Експериментално испитивање, ламиниране композитне плоче, DIC систем, модална анализа, сопствене фреквенције и модови осциловања, нумеричка симулација, оштећење, структурално праћење понашања структуре

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Ваздухопловство

УДК: 621.548.4:533.662 : 66.018.9 : 620.162:004.932(043.3)

621.548.4:533.662 : 004.942(043.3)

Impact of damage on dynamic characteristics of composite wind turbine blades

Abstract

The research presented in the theses is based on establishing the relationship between the dynamic and physical properties of composite structures in the case of structural changes, i.e. the appearance of damages and other defects that affect the functionality and integrity of the structure. The investigation includes the evaluation of the impact of the inflicted damages on the dynamic characteristics of the tested parts from experimental results and numerical simulations performed by finite element method. The tests were first performed on healthy composite parts that were deliberately impaired afterwards. From comparative results of the experimental and numerical approach, a discussion of the obtained results has been given, which forms the basis of a possible modification of the system in order to improve the functionality and fidelity of the entire structure. The research in this thesis is motivated by the great advantages of the DIC procedure (the method of digital image correlation) compared to conventional methods of experimental testing, especially in the definition of an algorithm for monitoring the behavior of composite structures. Novel, in-house methodology of experimental testing of frequency characteristics has been developed, as well as additional auxiliary laboratory installation for performing experimental measurements. Composite blade spar samples were tested prior to and after the deliberate infliction of structural damage (6 carbon-epoxy plates but with different layer orientation for each plate). The values of natural frequencies of all healthy and damaged plates were obtained and additional, in-house codes for signal processing were developed. Numerical simulations were performed by finite element method in commercial software package ANSYS, in particular modal analysis component system, and the first six computed modes and natural frequencies are presented. Subsequently, a comparative analysis of experimental and numerical results was performed, with a relative deviation of less than 5% for lower modes which are of interest in engineering

applications. For the purpose of an alternative validation as well as an additional level of application of the DIC method, the plates were exposed to static loads. An evaluation of the value of the bending stiffness and modulus of elasticity has been performed and the influence of the anisotropy of the composite laminates on the behavior of the plates is described. The experimental results obtained during the research validate the applied procedure and the methodology developed in this dissertation. Therefore, a successful application to smart composite structures can also be expected, which can be the direction of future research.

Key words: Experimental testing, laminated composite plates, DIC system, modal analysis, natural frequencies and modes, numerical simulation, damage, health monitoring

Scientific discipline: Mechanical engineering

Scientific sub-discipline: Aerospace engineering

UDC: 621.548.4:533.662 : 66.018.9 : 620.162:004.932(043.3)
621.548.4:533.662 : 004.942(043.3)

Садржај

1	Увод	1
1.1	Основне напомене	1
1.2	Испитивање динамичких карактеристика композитних структура – основе модалне анализе	3
1.3	Поступци експерименталног испитивања композитних лопатица ротора ветротурбине	5
1.4	Предмет истраживања и организација дисертације	7
2	Преглед литературе	10
2.1	Основе модалне анализе	10
2.2	Експериментални поступак испитивања – мерни систем за дигиталну корелацију слике	11
2.3	Композитне структуре	12
2.4	Нумеричка симулација – метод коначних елемената	12
2.5	Статичко испитивање здраве и оштећене композитне структуре	13
2.6	Поступак структуралног праћења (Health monitoring)	13
3	Одређивање динамичких карактеристика композитне лопатице	14
3.1	Увод	14
3.2	Теорија модалне анализе	14
3.3	Технике модалне анализе у експерименталном испитивању	20
4	Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика алуминијумске плоче пре и након	30

	оштећења	
4.1	Увод	30
4.2	Експериментално испитивање	31
4.3	Нумеричка симулација	37
4.4	Дискусија резултата	38
4.4.1	Експеримент	39
4.4.2	Нумерички резултати	41
4.4.3	Дискусија	42
5	Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења	44
5.1	Увод	44
5.2	Композитне структуре	45
5.2.1	Структура композитних материјала	51
5.2.2	Технологија израде композитних материјала	62
5.3	Експериментално испитивање композитних плоча	65
5.4	Нумеричка симулација	68
5.5	Дискусија резултата	69
5.5.1	Експеримент	69
5.5.2	Нумеричка симулација	79
5.5.3	Дискусија	88
6	Верификација DIC поступка статичким испитивањем композитних плоча	95
6.1	Увод	95
6.2	Експериментално испитивање – статичка анализа	96
6.3	Дискусија резултата	100
7	Закључак	108
7.1	Резултати истраживања	108

Садржај

7.2	Научни доприноси дисертације	111
7.3	Препоруке за будући рад	112
8	Литература	114

Глава 1

Увод

1.1 Основне напомене

Композитне структуре, услед својих бројних предности као што су: нижа цена производње и инсталације, повољан однос чврстоће и масе, отпорност на корозију итд. веома су заступљене у многим гранама индустрије. Међутим, оштећења структуре, која је слојевита, углавном нису видљиве пластичне деформације површинског слоја структуре већ укључују оштећења у матрици или раслојавање ламината. Благовремена детекција и санација оштећења је управо главни проблем при експлоатацији оваквих структура, а његово решење води ка знатним уштедама и продужетку функционалности структуре.

Познавање динамичких карактеристика конструкције: коефицијената крутости и пригушења, сопствених фреквенција, облика осциловања итд. пружа детаљан увид у тренутно стање конструкције. Било каква промена у конструкцији, након неког захвата или оштећења, резултује променом ових параметара. Из тих разлога, познавањем и упоређивањем полазних параметара неоштећене структуре и тренутно измерених параметара, могуће је извести закључке о тренутном стању и поузданости конструкције, даљем плану одржавања итд. Праћење динамичког понашања конструкције могуће је извести неинванзивним методама у реалном времену. Уз одговарајућу методологију и мерну опрему, могуће је детектовати и веома мале промене у структури.

Предмет истраживања доктората је утврђивање утицаја оштећења на динамичке карактеристике композитних лопатица ротора ветротурбина, односно, утврђивање релација између тренутног стања композитне конструкције и њених модалних карактеристика. Да би се правилно утврдила поменута зависност

потребно је познавати параметре исправне структуре, пратити – мерити или израчунавати тренутне параметре и извести закључке о исправности и функционалности.

Праћење стања конструкције подразумева: дијагностификовање оштећења, прогнозирање даљег развика оштећења и доношење одлуке о санацији. Цео систем је врло комплексан и његова примена на композитне лопатице ротора ветротурбина представља веома актуелну проблематику. Предмет истраживања је анализа и поређење различитих методологија извођења мерења и испитивање њихове применљивости на различите типове композитних структура. Упоредо су развијени и тестирани и одговарајући нумерички модели структура, и уз помоћ методе коначних елемената (МКЕ), израчунати њихови модални параметри. Подударност експерименталних и рачунских резултата може обезбедити значајну уштеду у времену и новцу потребном за спровођење мерења и значајно упростити фазу прогнозирања развика оштећења.

У складу са праћењем тренда повећања димензија композитних структура лопатица ветротурбина, одржавање, посматрање и поправка постају компликованије, што подразумева и развијање и унапређење неопходних техника које ће укључивати и експерименталне и нумеричке методе у циљу што ефикасније примене.

Праћење динамичког понашања конструкције омогућава одређивање природе одзива конструкције у различитим радним режимима, верификовање теоријских модела и одређивање битних особина материјала под дејством динамичког оптерећења које се могу искористити за праћење радне исправности дате конструкције.

Оштећење је овде дефинисано као низ промена у материјалу и физичким карактеристикама које утичу на перформансе и интегритет читавог система. Истраживање у оквиру дисертације заснива се на утврђивању веза између динамичких и физичких својстава композитних структура у случају промена у структури, односно појаве оштећења и других дефеката који утичу на функционалност и интегритет конструкције.

У оквиру истраживања било је потребно на основу експерименталних резултата и нумеричких анализа применом методе коначних елемената

композитне структуре у иницијалном стању и са унапред дефинисаном променом (нпр. у виду иницирања прслине, зареза) извршити процену утицаја оштећења на динамичке карактеристике дела.

На основу упоредних резултата експерименталног и нумеричког приступа, могуће је извршити модификације функционалности система у циљу даљег побољшања и прилагођавања перформанси композитних структура.

1.2 Испитивање динамичких карактеристика композитних структура – основе модалне анализе

У циљу верификовања радних карактеристика и конструктивних параметара израђених структура, потребно је испитати њихово понашање под утицајем (статичких и динамичких) оптерећења. Сопствене фреквенције могу бити блиске учестаности побуде структуре у радним режимима, као последица грешака у пројектовању и извођењу или као последица смањења масе конструкције односно појаве оштећења. Правилним одабиром конструктивних параметара утиче се на фреквентне карактеристике структуре. Формирање математичког модела и одређивање фреквентних карактеристика конструкције се може остварити модалном анализом, односно анализом експериментално добијених података о понашању конструкције при дејству статичких и променљивих оптерећења. У циљу испитивања конструкције променљивим оптерећењем, потребно је извршити побуду конструкције оптерећењима промењивог интензитета уз мерење одзива саме конструкције, обраду података и анализу добијених резултата.

Модална анализа представља проучавање сопствених карактеристика структуре. Разумевање сопствених фреквенција и облика осциловања (мода, режима) омогућава структурални дизајн система у примени вибрација и шума. Функција одзива фреквенције представља однос понашања система и деловања силе, односно реакцију система на дејство примењеног оптерећења. Понашање система може бити изражено преко померања, брзине или убрзања. Значајан аспект модалног тестирања је корелација и корекција аналитичког система и моделирања методом коначних елемената.

Као део сертификације поступка, прототипови лопатица ветротурбина су

подвргнути експерименталном поступку тестирања како би били обезбеђени услови испуњења захтеваног дизајна лопатице. Поред уобичајених тестова на дејство оптерећења и појаву замора, врше се испитивања основних динамичких карактеристика лопатица, као што су сопствене фреквенције и пригушна својства што је од суштинског значаја за динамичко понашање и структурални интегритет читавог система.

Познавање сопствених фреквенција и структуралних пригушних карактеристика не обезбеђује оптимално динамичко понашање ветротурбине када је изложена аеродинамичким силама. Последњих година, проблемима стабилности у структури ветротурбина је посвећена велика пажња, посебно у трендовима изградње већих и флексибилнијих структура. Познати пример проблема стабилности, који евентуално може довести до лома читаве структуре је појава вибрација на лопатици. За лопатице ветротурбина, од великог значаја су померања у бочном правцу и управно на раван обртања као и ротација лопатице око лонгитудиналне осе.

У циљу поједностављења и уклањања свих додатних (непознатих) утицаја, модел лопатице се може заменити структуром греде при структурним и аероеластичним прорачунима. Закривљеност је обично занемарена, што се заснива на чињеници да су основне компоненте структуре са затвореним попречним пресецима, где су структуралне везе између савијања у два правца и структуралне везе између торзије и савијања обично укључене, тако да значајно утичу на аеродинамичка оптерећења лопатице. За проверу структуралног модела, од великог значаја је употпуњење процедуре динамичког тестирања новим експерименталним методама погодним за одређивање структуралних модова.

Модална анализа је највише коришћена метода у карактеризацији динамичког понашања система где је експериментални поступак заснован на техници модалног испитивања ударом у циљу идентификовања одговарајућих модова осциловања, односно одређивања сопствених вредности фреквенција. Савремена експериментална испитивања заснована на модалној анализи обухватају технике које подразумевају уштеду у времену и ниже вредности трошкова тестирања.

1.3 Поступци експерименталног испитивања композитних лопатица ротора ветротурбине

Применом савремених експерименталних метода на верификацију нумеричких модела, постиже се настанак модела који верно представљају понашање структуре под дејством оптерећења у реалним условима.

Експериментални поступак у овом раду заснован је на техници модалног испитивања ударом и бележењем померања структуре, а очекиване функције одзива су упоређене са резултатима оствареним на 3D коначно-елементном моделу. Одговарајући модови повезани са три најниже сопствене фреквенције су успешно базирани на трансферу функција оптерећења плоче и измереном одзиву системом за дигиталну корелацију слике. У својој најједноставнијој форми, модална анализа захтева снимке само структуралног одзива. Референтни сигнал одзива је употребљен за узајамно повезивање снимљених одзива структуре и одређивања деформација и померања. Уколико је потребно извести анализу сигнала у фреквентном домену, од великог је значаја обезбедити исправан приказ фреквентних функција преноса трансформисаних побуда у одзивни сигнал. Метод анализе, коришћен за формирање резултата из измерених података, може бити изведен или у временском или фреквентном домену. Фреквентна анализа је заснована на концепту преносних функција и примењена је у овом експерименту.

Док се процесирањем измерених вредности у временском домену приказује промена сигнала у времену, анализом у фреквентном домену стиче се увид у расподелу енергије сигнала по опсегу фреквенција из ког разлога је она и нашла велику примену у анализи сигнала. Она у себи такође садржи и информацију о фазном померају међу основним периодичним чиниоцима сигнала.

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 је испитивана конструкција изложена у току

радног века. Постоје инсталације 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. Фактори који се разматрају при испитивању на замор су: еластичне карактеристике материјала лопатице, вибрације у резонантном режиму, различити спектри оптерећења у зависности од могућих радних режима, потребна учестаност одржавања током радног века.

Испитно-мерна инсталација за испитивање композитних сегмената лопатица на замор (статичка и динамичка оптерећења) најчешће је конструисана тако да буде компактна, једноставна за монтажу, а да уз то омогући и прецизно читавање измерених величина у свим фазама испитивања. При испитивању је могуће симулирати аеродинамичка оптерећења и инерцијална растерећења услед махања, оптерећења услед центрифугалне силе радијално у односу на сегмент лопатице и комбиновано оптерећење услед реалног истовременог деловања поменутих оптерећења. Оптерећења је могуће генерисати тако да се по убрзаном поступку обавља старење до предвиђеног ресурса.

Водеће испитне лабораторије у свету (RISO – Данска, CRES – Грчка, WMC – Холандија, NREL – САД) врше статичка и динамичка испитивања користећи савремене методе тестирања лопатица. Најчешће примењивани поступци су метод испитивања принудном силом у два правца (dual-axis) и метод једносмерног резонантног испитивања (single-axis), а у употреби је и иновативан поступак који комбинује карактеристике поменутих метода.

У овом истраживању скраћење времена тестирања је постигнуто увођењем и применом неконвенционалних метода испитивања као што је систем за дигиталну корелацију слике (Digital Image Correlation – DIC). Применом дигиталне фотографије и савремене рачунарске технологије, омогућена је анализа пуног поља тачака, што доводи до брже обраде података. Метода корелације дигиталних слика је настала почетком осамдесетих година двадесетог века у механици крутог тела, а многе процедуре дотупне и данас су засноване на методи корелације слика раније развијеној и у механици флуида.

Експериментални поступак подразумева припрему и постављање

испитиваног објекта, подешавање мерне инсталације DIC система и одговарајући софтверски пакет за прикупљање и обраду података. Коришћени тродимензионални DIC систем састоји се од: пара ултра-брзих стерео камера и сочива, синхронизатора који усклађује њихов рад, напајања и уређаја за контролу напајања и снимања слика, додатног осветљења, као и рачунарског система за аквизицију, обраду и приказ података који подразумева два различита софтвера. Камере DIC система су високих перформанси, односно чак и при значајним учестаностима снимања могу правити снимке високе резолуције, што омогућава кратке временске интервале мерења деформација, чиме је остварена велика предност над стандардним мерним процедурама. Померања измерена овом техником указују на високу прецизност што омогућава поређење са нумеричким методама и добијање резултата високог степена тачности. Недостатак МКЕ је у томе што се при моделирању не могу приказати недостаци материјала од којег је израђена конструкција или укључити ситне постојеће геометријске неправилности. Модел који се користи за прорачун коначних елемената представља идеализовани модел структуре, који нам даје само приближне резултате о деформацијама које се јављају на стварној структури. Применом савремених експерименталних метода на процес развоја и верификације нумеричких модела, напредује се ка добијању модела који верно представљају понашање структуре и под радним оптерећењем, што нам омогућава боље разумевање понашања реалних структура.

1.4 Предмет истраживања и организација дисертације

У оквиру првог поглавља докторске дисертације, наведене су динамичке карактеристике композитних структура и утицај појаве оштећења на њихову функционалност. Описане су основне карактеристике модалне анализе, односно фреквентне карактеристике као и значај експерименталног испитивања композитних структура у циљу добијања података о прецизном стању пре и након оштећења. Дат је кратак приказ експерименталног поступка који је примењен у испитивању као и кратак историјски осврт на развитак DIC методе, односно мерног система за дигиталну корелацију слике. Наведени су неки од поступака експерименталног испитивања који се примењују код композитних лопатица

ротора ветротурбина као и системи који представљају значајан потенцијал за унапређење и оптимизацију времена развоја нових модела. У завршном делу „Увода“ приказан је предмет истраживања и дата је организација дисертације.

Друго поглавље „Преглед литературе“ подељено је у шест целина. У првом делу дат је преглед литературе из области модалне анализе. У следећем делу приказана је литература која се односи на експериментално испитивање и хронолошки развој DIC система (оптичког мерног система за дигиталну корелацију слике) са посебним акцентом на испитивања и добијања резултата композитних структура. Након тога дат је кратак осврт на нумерички приступ симулације методом коначних елемената као и литература која се односи на састав композитних структура. На крају је наведена литература која је коришћена и при статичком експерименталном испитивању у циљу провере дефинисаних карактеристика испитиваних структура.

У оквиру трећег поглавља „Одређивање динамичких карактеристика композитне лопатице“ изнесене су основе одређивања динамичких карактеристика и математичка формулација модалне анализе у циљу што бољег разумевања извођења експеримента. У наредном делу описани су конвенционални поступци и технике модалне анализе који се примењују у експерименталном испитивању.

Четврто поглавље „Експериментално испитивање фреквентних карактеристика алуминијумске плоче пре и након оштећења DIC методом” обухвата сам поступак експерименталног испитивања, затим нумеричку симулацију плоче пре и након оштећења и на крају дискусију добијених резултата. Поступак DIC методом је детаљно представљен са свим корацима током испитивања при чему су приказани и забележени резултати (у временском домену) као и обрађени (у фреквентном домену) у одговарајућем софтверу. У делу који се односи на нумеричку симулацију, у комерцијалном програмском пакету ANSYS су одређени и приказани модови осциловања плоче. Након тога, извршено је поређење експерименталних и нумеричких резултата. У дискусији су описана поклапања и евентуална одступања експерименталних и нумеричких вредности сопствених фреквенција, на основу чега се дошло до утврђивања тренутног стања структуре, као и процени могућности даље санације оштећења.

У петом поглављу „Експериментално испитивање фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења DIC методом“ приказане су карактеристике композитних материјала као и поступци њихове израде. Приказане су испитиване композитне плоче са својим карактеристикама, при чему је сваки од 6 типова плоча посебно анализиран током експеримента пре и после оштећења. Добијени резултати су упоређени са одговарајућим нумеричким у циљу валидације података. У дискусији су анализирани вредности и промене три најниже сопствене фреквенције, као и сам утицај унапред дефинисаног оштећења на формирање новог у виду прслине. На тај начин се ствара увид у тренутно стање структуре и могућност праћења даљег понашања.

У шестом поглављу „Верификација DIC поступка статичким испитивањем композитних плоча“, приказана је допунска, алтернативна провера исправности као и додатни ниво примене описаног експерименталног поступка. Плоче су изложене статичком оптерећењу, савијању у z-правцу, након чега су разматрани резултати добијених померања и извршена процена валидације вредности савојних крутости и модула еластичности са еквивалентним. Односно, циљ је био утврдити, да ли и како нехомогеност и различита конфигурација слојева композитних плоча утичу на понашање статичких параметара.

У седмом поглављу „Закључак“ обједињени су научни и стручни доприноси и презентовани закључци везани за предмет дисертације. Извршена је верификација нумеричких анализа на основу постигнутих експерименталних резултата, што доприноси развоју система за одређивање утицаја оштећења на динамичке карактеристике композитних структура, методама обраде података и корелације са нумерички добијеним резултатима. Након приказа изведених закључака, може се на неки начин одредити смер даљег усавршавања и истраживања у овој области, као нпр. развој и имплементација алгорита за праћење стања композитних структура у смислу постављања критеријума за идентификацију нивоа оштећења према одређеним динамичким карактеристикама.

Глава 2

Преглед литературе

2.1 Основе модалне анализе

Под модалном анализом се подразумева поступак одређивања динамичких карактеристика система у форми сопствених фреквенција, пригушних фактора и облика осциловања, као и њихове формулације математичког модела за приказ динамичког понашања система.

Основна идеја модалне анализе је описивање њене сложене природе у структуралној динамици, једноставнијим параметрима, као што су сопствени облици осциловања (вибрација). Први покушаји спровођења ове идеје се везују за Fouier-a, који је тврдио да се једна неограничена периодична функција са коначним интервалом, може приказати као збир једноставних хармонијских функција. Како наводе аутори Не и Фу [1], Fouier-ови редови и спектрална анализа су базиране на развоју и настанку модалне анализе. Теоретски, модална анализа се може блиско идентификовати са једначином таласа који описује динамику вибрирајуће жице. Из решења, можемо одредити њене сопствене фреквенције, модове осциловања и одзиве – карактеристике које се данас дефинишу појмом модалних параметара. Овај ниво модалне анализе, развијен деведесетих година је највећим делом заснован на математичком решавању парцијалних диференцијалних једначина које описују различите динамичке структуре. Концепт дискретизације неког објекта и увођење матричне анализе у теоријској модалној анализи је започето почетком прошлог века. Теорија је сачињена тако, да је структурална динамичка анализа једног неограниченог система могућа уколико су познате дефиниције масе и крутости у својој матричној форми. Концепт теоријске модалне анализе је представљен на основу

сажетог приказа постојећих енциклопедија и књига из те области [2-8]. Појава оштећења и њихов утицај на понашање динамичких модалних карактеристика је разматрано у радовима [9-14], чији аутори су се бавили истраживањима базираним на тој тематици. Прегледане су и три докторске дисертације [15-17], као и магистарски рад [18], чије идеје и остварени резултати су били од великог значаја у спровођењу ове дисертације. Такође, при проучавању постојећих експерименталних метода испитивања фреквентних карактеристика (експерименталне модалне анализе) лопатица ветротурбина, наведени су радови [19-27], где су аутори приказали поступке и оцене степена прецизности коришћених метода. Основа експерименталне анализе лежи на алгоритму решавања брзих Фуријеових трансформација, односно фреквентни одзив структуре се може измерити помоћу улазних и резултујућих одзива и омогућава разумевање везе између измерених и модалних параметара испитиване структуре. Експериментални развој је у великој мери унапредио теоријску модалну анализу, пре свега због испитивања реалне структуре и могућности валидације стварних модалних параметара са резултатима нумеричке симулације.

2.2 Експериментални поступак испитивања – мерни систем за дигиталну корелацију слике

Неконвенционални експериментални поступак, на коме се и базира испитивање у овој дисертацији је метода корелације дигиталних слика (Digital Image Correlation – DIC). У монографији [28] описан је основни принцип методологије овог поступка испитивања. Упутства дата од произвођача оптичког система и пратећих софтвера за обраду података [29, 30] су представљала основу за почетак и припрему самог експеримента. Кратак преглед историјског развоја DIC система је наведен у радовима [31, 32]. Наведена је и значајна докторска дисертација [33], у којој су истраживања била усмерена у правцу испитивања и валидације DIC система. Примена методе корелација слика је анализирана на различитим типовима композитних структура без примене оштећења при израчунавању у следећим радовима [34-36], а затим и при појави и деловању динамичких оптерећења и промени модалних карактеристика [37-44].

Имплементација DIC система и нумеричке анализе у циљу верификације добијених резултата је анализирана кроз радове [45-50].

2.3 Композитне структуре

У монографијама [50-54] описане су основне карактеристике композитних материјала и наведена поља њихове примене као и основе механике структура од композитних материјала, а затим у монографији [55] описана је појава оштећења влакана и утицај на понашање такве композитне структуре. Анализиране су и докторске дисертације [56, 57] из области понашања фреквентних карактеристика карбонских композита. Анализа вибрационих карактеристика на ламиниране композитне структуре је разматрана у радовима [58-62], док су у радовима [63-65] описани појава оштећења и понашање услед динамичког оптерећења на лопатицама ветротурбина.

2.4 Нумеричка симулација – метод коначних елемената

МКЕ потекао је из матричне формулације метода сила коју је развио Аргирис са сарадницима средином педесетих година [66]. Прву монографију о методу коначних елемената издао је Зенкијевич са сарадницима [67]. Такође, основе метода и његовог програмирања на рачунарима изложене су у монографијама [68-70]. Монографије [71, 72] баве се применом метода коначних елемената за анализу ламинираних композитних конструкција. У докторској дисертацији [73], описана је унапређена примена методе коначних елемената у изогеометријској анализи ламинираних композитних структура. Примена МКЕ у одређивању модалних карактеристика на композитним структурама анализирана је у радовима [74-76]. Разматран је и одређен број радова са објављеним резултатима из области изогеометријске анализе као савременог и неконвенционалног поступка прорачуна композитних ламината [77-79]. Описана је и нумеричка симулација фреквентних карактеристика на лопатицама ветротурбина у радовима, као и инверзан поступак, односно настанак оптимизованог модела на основу задатих, унапред дефинисаних динамичких карактеристика [80-83].

2.5 Статичко испитивање здраве и оштећене композитне структуре

У циљу верификације примењеног експерименталног поступка, извршено је статичко испитивање композитних структура где су примењене стандардне мерне процедуре процедуре [84, 85]. Детаљан опис примене ARAMIS софтвера при израчунавању статичких померања дат је у публикацији [86]. Кроз рад [86] је анализирано понашање нехомогених карбонских ламината при статичком савијању. Такође је анализирана валидација остварених резултата применом DIC система у дистрибуцији и мерењу статичких параметара са нумерички симулираним у радовима [87-93].

2.6 Поступак структуралног праћења (Health monitoring)

Структурално праћење конструкције (Health monitoring) представља поступак постављања критеријума за идентификацију нивоа оштећења према одређеним динамичким карактеристикама дате структуре. У монографијама [94-96] су описани основа и примена ове методе на различитим конструкцијама, док су у монографијама [97, 98] описани поступци „Health monitoring“-а примењени на композитне структуре. Поред класичних композита, од великог значаја су и паметне композитне структуре, па циљ представља имплементација експерименталног одређивања модалних карактеристика у иницијалном стању и након оштећења са нумеричком симулацијом (метода примене неуронских мрежа) [99]. Докторска дисертација [100] даје остварене резултате у области одређивања динамичких карактеристика паметних композитних структура. Радови [101-103] се баве структуралним праћењем понашања модалних параметара паметних композитних структура. Кроз радове [104-114] је анализирано понашање и промена фреквентних карактеристика композитних лопатица ветротурбина у иницијалном стању и након оштећења, на основу чега се може очекивати допринос развоју система за одређивање утицаја и идентификације места оштећења и корелације са нумерички добијеним резултатима.

Глава 3

Одређивање динамичких карактеристика КОМПОЗИТНЕ ЛОПАТИЦЕ

3.1 Увод

У овој глави биће размотрене основе одређивања динамичких карактеристика и математичка формулација модалне анализе. Математички модел је представљен на примеру композитне лопатице ветротурбине, а који може бити примењен у прорачуну и других композитних структура. Наведене су и неке од најчешће примењених метода експерименталног испитивања техником модалне анализе.

3.2 Теорија модалне анализе

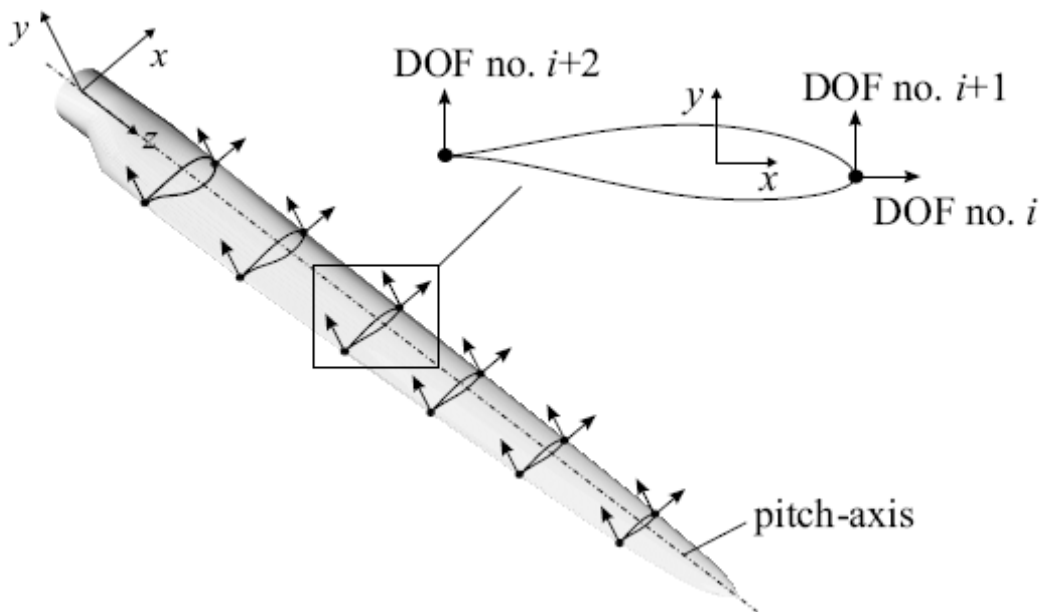
При експерименталном испитивању, није могуће измерити кретање свих материјалних тачака лопатице ветротурбине, па је кретање дискретизовано и описује се коначним бројем степена слободе. Облици модова лопатице су изражени у функцијама пречника: управно на раван обртања, у бочном правцу и преко торзије тетиве око осе закретања (оса од корена до врха око које се врши закретање лопатице). Претпоставља се да се сваки попречни пресек чврстог тела креће само у равни управној на осу закретања. За описивање кретања сваког пресека чврстог тела, потребна су три степена слободе. Степени слободе представљају скуп независних померања или ротација и одређују комплетно деформисану и померену позицију и оријентацију тела или система.

Слика 3.1 приказује конфигурацију изабраних степени слободе: два померања у бочном x - и управном y -правцу (означени са u_x и u_y) и једно

закретање као последица торзије попречног пресека у равни (означен са θ). Степени слободе су дефинисани правцем и позицијом. Правци и позиције три степена слободе у попречном пресеку су важни за описивање кретања крутог тела. За неке конфигурације степена слободе, одређивање u_x , u_y , и θ може бити врло осетљиво на појаву погрешних вредности у одређивању правца и позиције. Кретање чврстог тела може бити одређено као функција три амплитуде датих степена слободе:

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (3.1)$$

где вектор $\mathbf{u} = \{u_x, u_y, \theta\}$ означава кретање у попречном пресеку, вектор $\mathbf{x} = \{x_i, x_{i+1}, x_{i+2}\}$ одговарајуће амплитуде степена слободе док је \mathbf{A} матрица дата у функцији позиција и правца степена слободе. Релација (3.1) је применљива на било коју конфигурацију степена слободе уз претпоставку да је однос ротације и торзије у попречном пресеку мали ($\theta \ll 1$). Када бирамо конфигурацију степена слободе, потребно је обезбедити минималну осетљивост на грешке при кретању. Мала осетљивост на грешке у измереним амплитудама \mathbf{x} захтева мале елементе матрице \mathbf{A} . Мала осетљивост на грешке у конфигурацији степена слободе захтева мале изводе елемената у матрици \mathbf{A} , узимајући у обзир позицију и правац. Релација (3.1) се примењује на све попречне пресеке у израчунавању модалних амплитуда.



Слика 3.1. Дискретизовани модел лопатице

Порекло модалних карактеристика у датом експерименту је базирано на формулацији динамике лопатице у фреквентном домену. Фреквентни домен изражен у математичкој форми је од великог значаја у модалној анализи. Фреквенције су основне величине које карактеришу осцилаторно кретање система. Њихов број једнак је броју степена слободне система и искључиво зависе од сопствених особина система (матрица инерције, крутости и пригушења), тако да се за њих често користи назив сопствене фреквенције. У општем случају, фреквентна једначина са више степени слободне решава се применом нумеричких метода. Савремена рачунарска техника располаже програмима за приближно одређивање фреквенција до задовољавајуће тачности.

Сопствене фреквенције и логаритамски декременти су карактеристичне вредности структуре. Облици модова су модални (карактеристични) вектори. Главни облици служе за анализу кретања система јер представљају компонентална кретања, која, свако за себе, издвајају из опште промене координата само оне промене са истом фреквенцијом и фазом. Да би се упознао овај математички концепт, потребно је размотрити линеарну једначину слободног кретања лопатице. Померање степена слободне i означено са x_i , и вектори x_i описују дискретизовано кретање лопатице. Предпостављајући мала померања и умерену ротацију попречног пресека, линеарна једначина кретања гласи:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{S}\mathbf{x} = 0 \quad (3.2)$$

где је $(\dot{}) \equiv d/dt$, а матрице \mathbf{M} , \mathbf{C} и \mathbf{S} су матрице масе, пригушења и крутости. Заменом израза $\mathbf{x} = \mathbf{v}e^{\lambda t}$, једначина (3.2) постаје:

$$(\lambda^2\mathbf{M} + \lambda\mathbf{C} + \mathbf{S})\mathbf{v} = 0 \quad (3.3)$$

Решење овог проблема су сопствене вредности λ_k и кореспондентне вредности карактеристичних вектора \mathbf{v}_k за $k = 1, 2, \dots, L$. Генерално, сопствене вредности пригушене лопатице су комплексни бројеви облика $\lambda_k = \sigma_k + i\omega_k$. Веза између сопствених фреквенција ν_k , логаритамских декремената δ_k и сопствених вредности су $\omega_k = 2\pi\nu_k$ и $\delta_k = -\sigma_k/\nu_k$.

Уместо логаритамских декремената δ_k као мере пригушења, термин фактори пригушења се често користи за величину σ_k . Карактеристични вектор \mathbf{v}_k садржи модалне амплитуде $v_{k,i}$, у свим степенима слободне (i) за број модова k . Користећи релацију (3.1), померања у у-правцу управном на раван обртања и у

бочном x -правцу, и торзија мода могу бити срачунате за сваки попречни пресек из модалних амплитуда $v_{k,i}$, $v_{k,i+1}$, и $v_{k,i+2}$. Модалне амплитуде за пригушену лопатицу су комплексне. Имагинарни делови описују смене фаза између кретања у различитим тачкама лопатице. За благо пригушену лопатицу ове промене фаза су мале и обично занемарљиве. Када су промене фаза модалне амплитуде занемарљиве, резултујући модови су означени као нормални облици модова пригушене лопатице. Нормални модови су окарактерисани постојањем фиксираних чворова. Проблем својствених вредности показује да би одређивање сопствених фреквенција, логаритамских декремената и облика модова лопатице, могло бити одређено мерењем матрица масе, крутости и пригушења. Понекад су таква мерења отежана, па се уводи могућност мерења функције преноса (трансфера) у фреквентном домену који садржи довољан број информација за одређивање модалних карактеристика.

Дефиниција преносних функција

Функција преноса описује у фреквентном домену какав је одзив једног степена слободе на деловање силе другог степена слободе. То је дефинисано следећим изразом:

$$H_{ij}(\omega) \equiv \frac{X_i(\omega)}{F_j(\omega)} \quad (3.4)$$

где је ω фреквенција побуде, $X_i(\omega)$ Фуријеова трансформација одзива $x_i(t)$ степена слободе i и $F_j(\omega)$ Фуријеова трансформација силе $f_j(t)$ која делује на степен слободе j . Мерењем одзива x_i и силе f_j и извођењем Фуријеових трансформација, функција преноса H_{ij} може бити срачуната из (3.4). Ова функција преноса је једна од $L \times L$ функција које се могу измерити за лопатицу са L степени слободе. Комплетан скуп функција формира матрицу преноса **H**.

Фуријеова трансформација

Трансформацију између два домена (временског и фреквентног) могуће је извести нпр. Фуријеовом трансформацијом којом се оригинална функција у временском домену разлаже на (бесконачну или коначну) суму компонената синусног облика. Излаз је комплексног облика и садржи две информације –

реалан и имагинаран део, односно амплитуду и фазни померај сигнала на одређеној фреквенцији. Истакнутија вредност амплитуде (пикови на фреквентном дијаграму) указује на постојање периодичног сигнала веће енергије у односу на околне, односно на постојање периодичне компоненте у полазном, оригиналном, (запрљаном), измереном сигналу.

Дискретна Фуријеова трансформација функције (вектора) X у Y :

$$Y(k) = \sum_{j=1}^n X(j)W_n^{(j-1)/(k-1)} \quad (3.5)$$

где је:

$$W_n = e^{-2\pi i/n} \quad (3.6)$$

Веза између функција преноса и модалних карактеристика

Прорачун свих облика осциловања, може бити добијен помоћу само једног реда или колоне преносне матрице \mathbf{H} . Ред функција преноса се може добити из експеримента мерећи одзив на свим степенима слободе, док је тачка побуде фиксирана за један степен слободе. Да би се добила колона матрице, одзив је измерен на једном степену слободе док се тачка побуде креће на свим степенима слободе. Да би се разумео основни принцип модалне анализе, разматра се линеарна једначина кретања (3.2) за лопатицу са спољашњим побуђивањем:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{f}(t) \quad (3.7)$$

где је вектор \mathbf{f} вектор силе који садржи спољашње компоненте силе $f_j(t)$ које делују у свим степенима слободе $j = 1, 2, \dots, L$. За решавање ове једначине, претпоставља се да су вредности сопствених вектора \mathbf{v}_k познате. Ортогоналност сопствених вектора се добија из решења једначине (3.7) и може бити написана као модална експанзија:

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{k=1}^L \mathbf{v}_k q_k(t) \quad (3.8)$$

где је q_k генерализована координата у зависности од времена. Убацујући (3.8) у једначину кретања (3.7), умножавајући са \mathbf{v}_k^T и користећи сопствене векторе, једначина (3.7) постаје:

$$\ddot{q}_k - 2\sigma_k \dot{q}_k + (\omega_k^2 + \sigma_k^2) q_k = \mathbf{v}_k^T \mathbf{f}, k = 1, \dots, L \quad (3.9)$$

Ова једначина показује да су генералисане координате q_k одвојене. Одвојени модови указују да се функције преноса могу изразити преко суме модалних функција преноса. Користећи (3.4) и Фуријеове трансформације (3.8) и једначину (3.9), матрица преноса је изражена као:

$$\mathbf{H}(\omega) = \sum_{k=1}^L \mathbf{H}_k(\omega) = \sum_{k=1}^L \frac{\mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T}{(i\omega - \sigma_k - i\omega_k)(i\omega - \sigma_k + i\omega_k)} \quad (3.10)$$

Ова релација је основа модалне анализе. Она повезује мерљиве функције преноса са модалним карактеристикама ω_k , σ_k , и \mathbf{v}_k . Сваки мод k у комбинацији са модалном матрицом преноса \mathbf{H}_k доприноси настанку комплетне матрице, односно измерена функција преноса може бити апроксимирана сумом модалних преносних функција:

$$H_{ij}(\omega) \approx \sum_{k=1}^L H_{k,ij}(\omega) \quad (3.11)$$

где модалне функције преноса $H_{k,ij}$ могу бити изражене преко:

$$H_{k,ij}(\omega) = \frac{r_{k,ij}}{i\omega - p_k} + \frac{\bar{r}_{k,ij}}{i\omega - \bar{p}_k} \quad (3.12)$$

где цртица означава комплексну коњугацију, $p_k = \sigma_k + i\omega_k$ се назива пол мода k , и $r_{k,ij} = v_{k,i}v_{k,j}$ се назива остатак мода k на j -том степену слободе. Пол је комплексна величина која описује фреквенцију и пригушење мода. Остатак је комплексна величина која описује производ две комплексне модалне амплитуде. Модалне карактеристике су изведене из измерених функција преноса помоћу криве која апроксимира скуп података односно параметара „пола“ и „остатка“.

Прецизност апроксимираних сопствених фреквенција, пригушења и облика осциловања заснована је на следећим чињеницама: прецизности измерене преносне функције, линеарности динамике лопатице и апроксимација карактеристика степена слободе. Грешке мерења функције преноса директно утичу на одговарајуће криве које се користе у прорачуну модалних карактеристика. Грешке мерења могу потицати из експерименталне модалне анализе. Незадовољавајућа фреквентна резолуција функције преноса умањује прецизност добијања одговарајућих кривих. Нелинеарност динамике лопатице ће довести до непрецизних вредности функције преноса и одговарајућих кривих.

3.3 Технике модалне анализе у експерименталном испитивању

Модална анализа обезбеђује информације о динамичким карактеристикама структуралних елемената у резонантном домену, што доводи до разумевања детаљног динамичког понашања система. На почетку експерименталног испитивања динамике лопатица модалном анализом, јављају се следећа питања: како побудити лопатицу и како обезбедити жељени одзив убрзања или померања у изабраном попречном пресеку. Текст у наставку односи се на устаљени, често примењивани поступак испитивања модалних карактеристика лопатице ветротурбине.

Технике побуђивања

Постоје два типа технике побуде – повремена побуда (слободне вибрације) и континуална побуда (принудне вибрације). Континуална побуда се обично изводи са електромагнетним или хидрауличким побуђивачима који могу изазвати побуду случајног сигнала са истом снагом у свим тачкама датог опсега фреквенција, псеудо случајну или периодично случајну побуду. Обично, побуда се врши само у једној тачки (за велике или високо пригушне структуре, могуће је да се предност постиже применом више ексцитатора симултано). Повремени тип побуде је обично придружен импулсном принудном оптерећењу.

Захтевани снимци

Независно од изабраног метода побуде, у пракси је обично неопходно третирати изабрани попречни пресек лопатице сукцесивно да би се добило просторно решење помоћу својствених вектора у описивању модела за великогабаритне структуре. Уколико су доступна неограничена помоћна средства у опреми, сви захтевани сигнали одзива могу бити измерени симултано. У својој најједноставнијој форми, модална анализа захтева снимке само структуралног одзива. Референтни сигнал одзива је захтеван за повезивање узајамно снимљених одзива попречног пресека и одређивања деформација. Примена ове експерименталне процедуре искључује добијене резултате који су затим коришћени у анализи система обезбеђујући информације о крутости структуре и карактеристикама масе. Поред структуралног одзива, такође је могуће снимити и

принудну побуду (њену јачину и правац), тако да и други параметри система (крутост и маса) могу бити идентификовани осим информација о сопственим фреквенцијама и пригушним карактеристикама.

Метод анализе

Метод анализе, коришћен за формирање резултата из измерених података, може бити изведен или у временском или у фреквентном домену. Метод временске анализе је заснован на најмањем квадрату оптимизираних модалних амплитуда, модалног пригушења и модалних фаза датих у изабраном броју резонанци. Фреквентна анализа је заснована на концепту преносних функција.

Конвенционалне експерименталне процедуре

Експериментална испитивања подразумевају постојање одговарајуће инсталације и мерне опреме којом се мере померања, деформације, напони. Проблем који се најчешће јавља у пракси је прецизност експерименталног мерења просторног поља померања и деформација на местима дисконтинуитета структура.

Најчешће коришћене екстензометријске методе су мерне траке и механички екстензометри. Метод мерних трака се користи у мерењу локалних деформација на реалним структурама и физичким моделима. Главни недостатак овог поступка је немогућност приказивања комплетног поља деформација по целој површини структуре. Механички екстензометри се користе за мерење локалне деформације механичким путем, али су исто као и метод мерних трака, ограничени на мерење локалних параметара.

У савременим институцијама и компанијама које се баве експерименталним мерењима, напори су усмерени ка традиционалном приступу примене повремено принудне побуде у комбинацији са фреквентном анализом заснованом на преносним функцијама.

Побуда

Повремена побуда силом је извршена употребом одговарајућег уређаја (модалног чекића) задовољавајуће масе и брзине који удара лопатицу,

обезбеђујући почетну брзину и убрзање. Структура се пре побуђивања налазила у стању мировања. Лопатица почиње да осцилује у складу са дискретизованим сопственим решењима. Идеално, разматрајући силу побуде у математичком смислу помоћу импулсне Диракове делта функције δ , побуда чекићем омогућава да све фреквенције буду побуђене симултано са једнаком количином енергије:

$$\mathbf{f}(t) \equiv \mathbf{f}_0 \delta(t - t_0) \quad (3.13)$$

где је Фуријеова трансформација спољашње силе формулисана као:

$$\mathbf{F}(\omega) \equiv \mathbf{f}_0 \quad (3.14)$$

Концепт Диракове функције је теоријска апстракција, и ударац чекићем ће имати одређено време трајања, са последицом одузимања горње фреквенције која је унета у Фуријеовом спектру силе побуде. Ова чињеница је искоришћена у савременим експерименталним процедурама, примењујући главу чекића као механички филтер и стварајући погодан избор главе чекића као значајног параметра за овај тип повремене побуде. За лопатице ветротурбине је релевантан само опсег ограничених фреквенција између 0.5 Hz и 30 Hz. У овом случају, глава чекића може бити подешена за концентрацију укупне енергије побуде, одржавајући удар чекића у овом фреквентном опсегу. Увођење одузете фреквенције у спектар побуде на овај начин одговара захтеваном сигналу и резолуцији времена сигнала побуде поред одзивног сигнала.

Импликације резолуције сигнала су блиско повезане са односом сигнал/шум у релевантном фреквентном опсегу. Уколико су побуђени модови нежељене високе фреквенције, висок ниво сигнала убрзања у фреквентном опсегу ће бити присутан у одзивном сигналу. Ако је јачина одзива убрзања једнака тенденцији одступања амплитуде са квадратом сопствене фреквенције (хармонијске осцилације), осетљивост појачавача би могла бити регулисана овим краткотрајним брзим померањима, изазивајући неприхватљиву резолуцију амплитуде значајног ниско фреквентног дела одзива. Ово би могло да доведе до смањења односа сигнал/шум у релевантном фреквентном опсегу. Увођењем механичког филтера оваква краткотрајна брза померања су избегнута, а осим тога, јачина побуде, поред одзивног сигнала, у значајном фреквентном опсегу је увећана. Претпостављајући удео шума (и да је тај удео независтан од нивоа сигнала), насталог из електронске мерне опреме, однос сигнал-шум ће бити

унапређен услед примене механичког филтера.

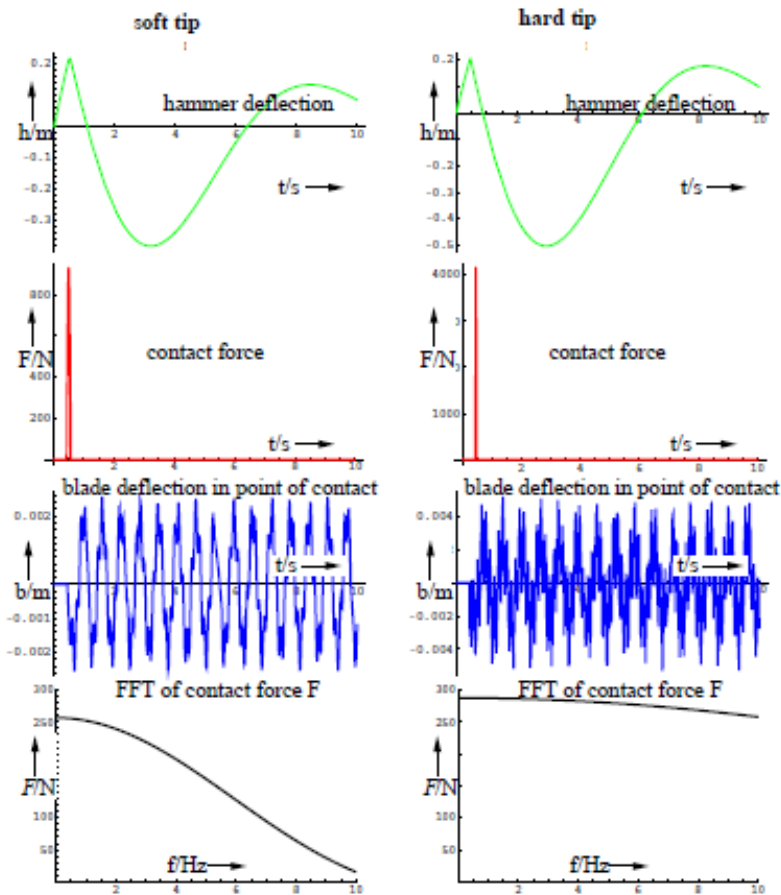
Импликације за резолуцију времена сигнала побуде су повезане са могућом нестабилношћу фреквентне функције преноса генерализаног спектра изазваног „псеудо“. Уколико је потребно извести анализу сигнала у фреквентном домену, од великог значаја је обезбедити исправан приказ фреквентних функција преноса трансформисаних побуда у одзивни сигнал. Увођењем одговарајућег механичког филтера, псеудо приказ је избегнут избором примера брзине са Најквистовом фреквенцијом, превазилази се одузета фреквенција. Одузета фреквенција, уведена механичким филтером је блиско повезана са трајањем контакта између лопатице и главе чекића при удару. Период трајања контакта зависи од брзине удара, брзине повратка у претходно стање, еластичних карактеристика структуре/чекића, врха пречника и масе чекића.

Да би се превазишли наведени проблеми у примени ручно вођених изазивача удара, уводи се електромеханички чекић (уређај за брзо реаговање на други повезани елемент). Чекић је заснован на принципу електромагнета, где се два калема независно померају помоћу клипа. Калемови су повезани електричним колом које производи правоугаони сигнал струје, са дефинисаним нивоима и временом трајања. Ово обезбеђује жељене могућности за контролу брзине и успоравање непосредно пре удара да би се избегли вишеструки скокови. Јаснији удар заједно са могућношћу добијања удара са понављајућим карактеристикама, може значајно побољшати везу сила/сигнал у поређењу са ручно вођеним чекићем, посебно у ниско фреквентном опсегу. Још једна карактеристика је могућност симултане оперативности неколико изазивача удара резултујући побудом у више тачака. Идеја увођења брзореагујућег уређаја за изазивање побуде може се остварити употребом пнеуматских или хидрауличких актуатора.

Осим потенцијалне модификације система за изазивање побуде у савременим приступима испитивања, великогабаритне лопатице ветротурбина са својим врло ниским вредностима сопствених фреквенција, могу захтевати примену акцелерометара директне струје уместо пиезоелектричних да би се побољшао квалитет апроксимираних преносних функција и према томе квалитет модалне анализе.

Слика 3.2 приказује основни ефекат на карактеристике лопатице побуђене

силом насталом применом две различите крутости главе чекића. Резултати су базирани на једноставном математичком моделу у коме је лопатица апроксимирана моделом греде са 9 степени слободе.



Слика 3.2. Нумерички модел побуде лопатице чекићем примењујући две различите крутости главе чекића

При испитивању пригушне карактеристике модела су занемарене. Чак и када је генерално кретање чекића апроксимативно исто у оба експеримента, јављају се одређене разлике. Трајање удара је значајно дуже употребом мекше главе чекића у складу са опадањем спектра силе побуде и умањује садржај компоненти високих фреквенција у одзиву. У зависности од динамичких карактеристика лопатице, глава чекића се прилагођава изабраном експерименту. Ово је у основи пробни процес који може бити подржан нумеричким истраживањима.

Одзив

Одзивни сигнали садрже убрзања/померања мерена на произвољном броју попречних пресека дуж осе закретања. На сваком попречном пресеку су постављена два униаксијална акцелерометра бележећи убрзања у правцу управном на раван обртања и један униаксијални акцелерометар бележећи убрзање у бочном правцу. Сваки попречни пресек је претпостављен у равни управној на осу закретања. Уз претпоставку малих померања, постоји јединствена веза између записа акцелерометра и модалних померања попречних пресека изражених преко померања у бочном правцу и правцу управном на раван обртања као и торзије око осе закретања. Ова повезаност може се користити у разматрањима одређивања најподесније дефиниције степена слободе у попречном пресеку:

- ➔ Разлика између два записа акцелерометра убрзања у правцу управном на раван обртања би требало да буде што је могуће већа.
- ➔ Угао између њихових измерених оса би требало да буде близу нула степени.

Референтна оса

Да би се остварила веза измерених вредности модалних померања у једном попречном пресеку са померањима у другом, неопходно је дефинисати референтну осу лопатице. Референтна оса обезбеђује срачунавање померања у сваком попречном пресеку. У савременим испитним лабораторијама, референтна оса је изабрана као оса симетрије мерена од попречног пресека корена лопатице до врха.

Извори грешака

При разматрању испитивања ударом и израчунавању модалних карактеристика у фреквентном домену, одређивање функције преноса је од великог значаја. Због тога, поред прецизности геометријских величина, као што су мерење локације и правца, прецизност измерене преносне функције и записа сигнала је неопходна.

Непрецизности при мерењу карактеристика степена слободe

Да би се умањиле непрецизности, које потичу из погрешне дефиниције геометрије (лоши технички подаци правца или локације силе), размотрени су различити приступи.

Два приступа су испитана при регулисању записа одзива:

- 1) постављање акцелерометра директно на површину лопатице,
- 2) постављање акцелерометра на специјално дизајнирану структуру која је причвршћена за лопатицу.

У основи, примењена структура се састоји из уређаја повезаног са гредом на којој су постављени акцелерометри, слика 3.3. Уређај је повезан са гредом помоћу шарки које омогућавају ротацију око осе управне на осу греде. Уређај је опремљен са три подешавајуће ноге и лако причвршћен за главни попречни пресек лопатице притезањем појаса. Постављена греда је опремљена уравнотежавајућим елементима који олакшавају подешавање правца бележења помоћу ротирања на шаркама и подешања дужина ногу уређаја.



Слика 3.3. Уређај за мерење одзива

У погледу одређивања локација степена слободe, релативно у односу на неки глобални координатни систем лопатице, две методе снимања су размотрене услед непрецизности датих карактеристика. Одређивање локације степена слободe је понекад једноставније применом акцелерометара директно постављених на површину лопатице, где је довољно једноставно измерити релативне координате а затим их трансформисати у апсолутне, засновано на детаљном приказу стварне лопатице. Фактор који отежава овакво испитивање, је

неподесност позиције ове структуре за мерење. Проблем може бити решен избором референтног ласерског снопа на погодној удаљености од површине лопатице. Поравнањем акцелерометра у вертикалном положају, тачка пресека ласерског снопа и монитора причвршћеног на уређај, обезбеђује неопходну информацију за процену позиције степена слободе у глобалном координантном систему.

У погледу одређивања праваца степена слободе, методом бележења на уређају за мерење одзива, појављује се отежаност контролисања праваца мерења акцелерометра, када су директно монтирани на површину лопатице. Финално испитивање лопатице при методи бележења је базирано на мерном мосту где је добијена много боља резолуција одзива торзије. Осетљивост торзионог мода на грешке у локацији и правцима, може бити умањена одговарајућим дефиницијама степена слободе.

Аналогно неподешености опреме снимања, нестабилности настају у модалним померањима лопатице, уколико је правац примењене силе неодговарајући. Да би се избегле такве неправилности, три различите технике оптерећења ударом су испитане: клатном, ручно вођеним чекићем и специјално вођеним чекићем (клацкањем – наизменичним кретањем горе доле). Клатно које се користи у овој техници представља снажну греду чија су оба краја везана ланцем. За ово клатно је карактеристична добра контрола нивоа силе и правца, али његово постављање захтева веома стабилну структуру која би га подржала, па је употреба ограничена на хоризонталну побуду. Из ових разлога, овај тип побуђивача је искључен у даљим анализама. Класични ручно вођени чекић је коришћен само за побуду мањег узорка лопатице. Због отежане контроле правца поред нивоа силе, овај метод се ретко користи. Специјално вођени чекић је у овом случају заварени део метала у облику ковачког чекића, обезбеђен стандардним, практичним подизањем. Ову методу карактерише добра контрола правца силе а такође постоји могућност различитог позиционирања дуж лопатице уз оперативност побуде у хоризонталном, поред вертикалног положаја. Разматрана метода је најпогоднија за повремену побуду лопатице ветротурбине. Осим неправилности у специфичном правцу деловања силе и бележењу података, могуће неправилности у специфичној локацији ових величина такође утичу на

резултате модалне анализе.

Основни захтеви за одређивање преносне функције су да улазни и одзивни сигнали буду погодни за извођење Фуријеових трансформација, и да улазни сигнал буде различит од нуле при свим значајним фреквенцијама. Следеће разматрање се односи на израчунавање преносне функције. Одговарајући метод је израчунавање преносне функције изражене односом између Фуријеових трансформација одзива и улаза преко једначине (3.4). Најпогоднији прилаз, укључујући процедуру одређивања сигнала, је израчунавање преносне функције преко односа посматраног улаза и одзивног сигнала и снаге посматраног сигнала силе.

Могуће нелинеарности испитиваног физичког система ће довести до извесних одступања у израчунатој преносној функцији. Примена преносне функције у модалној анализи претпоставља физички систем са константним линеарним параметром и у случају ове претпоставке је нарушен; ефекат на срачунату преносну функцију ће бити сличан ефекту изазваном конвенционалним сигналним шумом.

Извори шума

Одржавање сигнала је значајан параметар за добијање задовољавајућег прорачуна преносне функције система. Један од основних начина распознавања савременог типа тестирања лопатице је да одзивни сигнал често комбинује ниже нивое сигнала са нижим фреквенцијама. Однос сигнал/шум није повезан само са електронским карактеристикама опреме за бележење података. Редуковање неправилности је засновано на искуству испитивача и могућности он-лине филтрирања константним праћењем квалитета побуде.

У циљу унапређења нумеричких модела и прецизности анализе структура комплексних геометрија, потребно је извршити експериментална мерења применом метода које омогућавају мерење поља померања и на местима већих геометријских дисконтинуитета, посебно насталих услед оштећења.

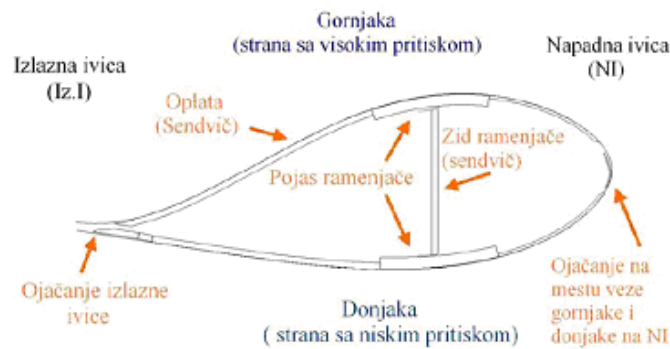
Из наведених поступака експерименталног испитивања, може се извести закључак о отежаним условима и могућности примене, пре свега, постојању адекватне опреме и мерних инсталација, дужег временског периода тестирања и

задовољавајуће прецизности добијених података. Из тог разлога, све више су у употреби неконвенционални, неинванзивни методи експерименталног испитивања – као што је нпр. оптички мерни ситем за дигиталну корелацију слике, који је и примењен у овом раду и детаљно представљен у наредним поглављима. Мерни поступак је спроведен на узорцима материјала који су највише заступљени на сегментима рамењаче композитне лопатице.

Лопатица ротора ветротурбине се најчешће састоји од следећих елемената:

- спољашње оплате (панела) – дефинишу аеродинамички облик лопатице,
- рамењаче – елемент који се простире у подужном у-правцу,
- унутрашњости лопатице која носи део савијања лопатице под утицајем оптерећења,
- ребара – преносе оптерећења са оплате на рамењачу,
- уређаја за заштиту од грома,
- аеродинамичке кочнице.

Основни елементи и попречни пресек лопатице ветротурбине приказани су на слици 3.4.



Слика 3.4. Структура лопатице

У оквиру овог рада, испитивање динамичких карактеристика ће се даље односити на композитне сегменте рамењаче лопатице.

Глава 4

Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика алуминијумске плоче пре и након оштећења

4.1 Увод

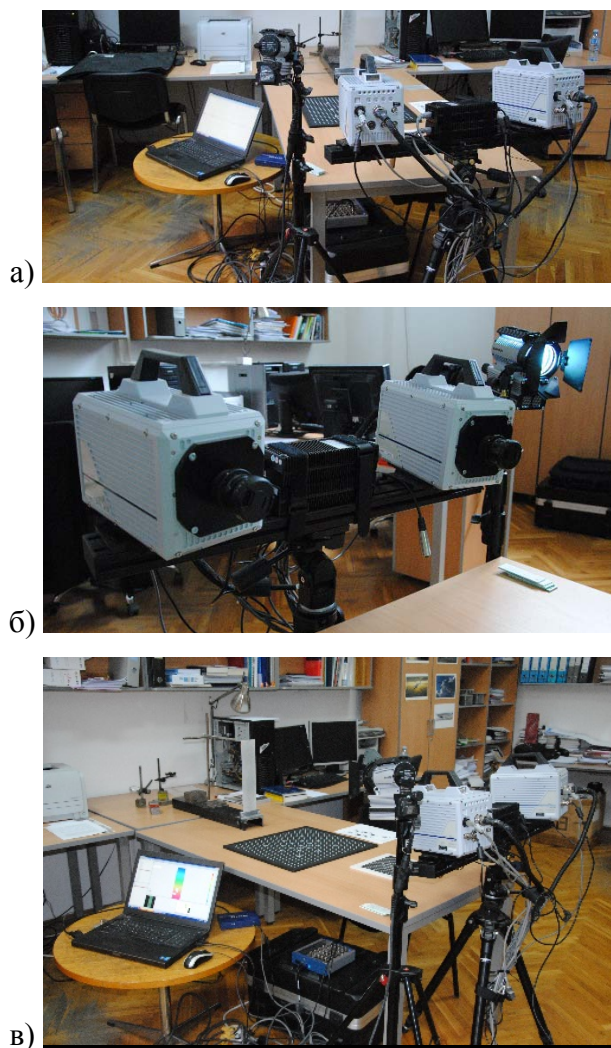
Структуре базиране на деловима израђеним од алуминијума, услед својих бројних предности, веома су заступљене у многим гранама индустрије, па и у ветроиндустрији на лопатицама ветротурбина, чиме се повећава и проценат оштећености, која настапа након дуготрајне употребе и изложености различитим условима рада. Санација оштећења и благовремена детекција представљају главни проблем при експлоатацији структура и делова, при чему решење тога води ка знатним уштедама и продужетку функционалности структуре. Сам поступак провере алуминијумске структуре, мерења померања и прорачуна динамичких карактеристика такође може бити заснован на оптичком мерном поступку помоћу дигиталне корелације слика. У овој глави су приказана испитивања и дејства динамичких оптерећења на алуминијумску плочу, као и анализа оштећења изазвана динамичким оптерећењем. Након тога, измерене сопствене фреквенције и модови упоређени су са коресподентним сопственим фреквенцијама и модовима добијених прорачуном помоћу методе коначних елемената, да би се добила оцена

Глава 4: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика алуминијумске плоче пре и након оштећења

нивоа оштећења структуре и извели закључци о даљој санацији и евентуалном спречавању оштећења.

4.2 Експериментално испитивање

Типичан DIC систем (слика 4.1) се састоји из сензорске јединице (једне или две камере – потребан број камера се бира у зависности да ли се поље померања изводи у 2D или 3D простору), уређаја за контролу напајања и снимања слика и система за прикупљање, обраду и анализу података.



Слика 4.1. DIC систем; а) компоненте; б) сет камера; и в) рачунарска јединица

У овом испитивању, две високо квалитетне, ултра брзе камере (FASTCAM SA6 75K-M3 са 32 GB меморије, максималне учестаности снимања 75000 fps,

Глава 4: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика алуминијумске плоче пре и након оштећења

максималне резолуције 1920×1440 пиксела) су примењене током мерења при одговарајућој брзини снимања 3000 fps (фрејма у секунди) и резолуцијом слике од 1024×512 пиксела у циљу добијања веома кратког интервала снимања и високог нивоа прецизности.

Плоча се пре побуђивања налазила у стању мировања. Након механичког удара, плоча почиње слободно да осцилује, при чему се померања бележе у виду одзивног сигнала. Сам поступак динамичког испитивања, односно побуђивање и осциловање плоче је снимљено у програмском пакету PHOTRON, а затим су добијени подаци увежени у софтвер за обраду и прорачун ARAMIS.

Систем за оптичко мерење (ARAMIS) је бесконтактни 3D систем за мерење деформација, као и анализу, прорачун и документовање података. Систем за оптичко мерење померања и деформација снима структуру површине мереног објекта и прави запис у облику дигиталних фотографија, а затим додељује координате сваком пикселу на слици. Прва слика објекта представља недеформисано стање. Након или током деформисања објекта, снимају се додатне слике, и затим програм упоређује фотографије и рачуна померања и деформације карактеристичних делова структуре. Пре почетка снимања, неопходна је припрема површине у виду одговарајућег патерна. Систем за оптичко мерење померања и деформација је нарочито погодан за мерење тродимензионалних померања и деформација насталих под статичким или динамичким оптерећем и анализу деформација реалних структура. ARAMIS систем може да мери деформације у опсегу од 0.01 до 2000%, као и померања до 1 μm . Подручје примене овог система се односи на: тестирање материјала, тестове оптерећења, графички приказ измерених резултата помоћу дијаграма, верификацију методе коначних елемената, анализу деформација и понашања хомогених и нехомогених материјала.

Систем за оптичко мерење ARAMIS – процедура испитивања

Пре сваког мерења је неопходно подесити одговарајуће параметре да би се извело само мерење. За правилно извођење процедуре мерења, потребно је извршити и следеће кораке:

- 1) Одређивање мерне запремине,

- 2) Припрема узорка,
- 3) Хардверско подешавање система,
- 4) Калибрација система,
- 5) Софтверско подешавање система,
- 6) Снимање слика током мерења,
- 7) Обрада резултата,
- 8) Документовање резултата.

Одређивање мерне запремине

Мерна запремина зависи од величине мереног објекта или од области која се анализира. Потребно је изабрати мерну запремину коју мерена структура или област испуњава што више. Такође је битно, да структура остаје унутар мерне запремине у свим корацима деформисања. Уколико је потребно прилагодити мерну запремину, потребно је и поново подесити и калибрисати сензоре.

Припрема узорка

Структура површине је веома битна при извођењу мерења, па површина мора испунити следеће захтеве: мора постојати одређена шара (шаблон) да би се јасно издефинисали пиксели на сликама са камера; мора бити у могућности да прати деформацију узорка и не сме се мењати током експеримента; такође, шара мора бити мат, односно без сјаја јер рефлектована светлост изазива лош контраст и разлику у осветљењу између леве и десне камере и даје непрецизне резултате при прорачуну у областима где се јавља. Највише одговарају стохастичке шаре које су прилагођене контролној запремини, резолуцији камере и величини области процесирања. Пре почетка наношења стохастичке шаре, неопходно је обезбедити чисту и по могућности, што глаткију површину. У првом кораку, уколико је потребно, нанети бели мат слој, а онда црну шару. Мање контролне запремине захтевају финију шару од већих.

У овом експерименту, тестирани узорак је припремљен за наношење патерна – стохастичке шаре, ради постизања процеса упаривања тачака на сликама. Слој беле боје је прво нанесен на мерну површину, а потом следећи у виду фине дисперзије црних тачака, а у циљу постизања бољег контраста и

Глава 4: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика алуминијумске плоче пре и након оштећења

распознавања. Због тога што је у овом раду циљ био добијање и виших вредности сопствених фреквенција са великом брзином приликом снимања и кратким интервалом могуће осветљености, било је потребно припремити што мању мерну површину са финијом шаром и добрим контрастом.

На слици 4.2 је приказана алуминијумска плоча са одговарајућим патерном, глобалних димензија (350×79×2) mm, слика 4.2а. Први сегмент испитивања се односио на здраву структуру, а следећи је поновљен истом процедуром, при чему је плоча оштећена у виду зареза димензија (35×2) mm и елипсастог отвора димензија (20×13) mm, слика 4.2б.



Слика 4.2. Алуминијумска плоча; а) здрава и б) оштећена

Хардверско подешавање система

Пре почетка мерења, одговарајућа мерна запремина се мора изабрати у зависности од величине мерене структуре. Запремина мерења дефинише растојање између сензорске јединице и узорка за мерење. Пре употребе система, неопходно је подешавање сензорске јединице, односно потребно је извршити хардверску калибрацију система (подесити угао између сочива односно камера, фокусирати сочива и отвореност бленде) у складу са упутствима произвођача. Након тога се цео систем софтверски калибрише помоћу калибрационих плоча. Када се калибрацијом успешно подеси запремина мерења, може се почети са експерименталним мерењима.

Калибрација система

Калибрација је процес током којег се мерни систем помоћу калибрационих тела подешава тако да се обезбеди димензиона конзистенција система за мерење.

Глава 4: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика алуминијумске плоче пре и након оштећења

Калибрација је неопходна због прецизности мерења и подразумева подешавање камера тј. усклађеност видног поља камера и испитиваног објекта као и формирање мерне запремине (растојања између камера и узорка за мерење). Калибрациона плоча (слика 4.3) садржи податке о размери, где је размера одређено растојање између две референтне тачке. Параметри калибрације су претходно дефинисани од стране произвођача (растојање између камера и њихова оријентација, фокус итд). На основу ових подешавања, програм прорачунава референтне тачке калибрационе плоче на дводимензионалним сликама и одређује њихове тродимензионалне координате.

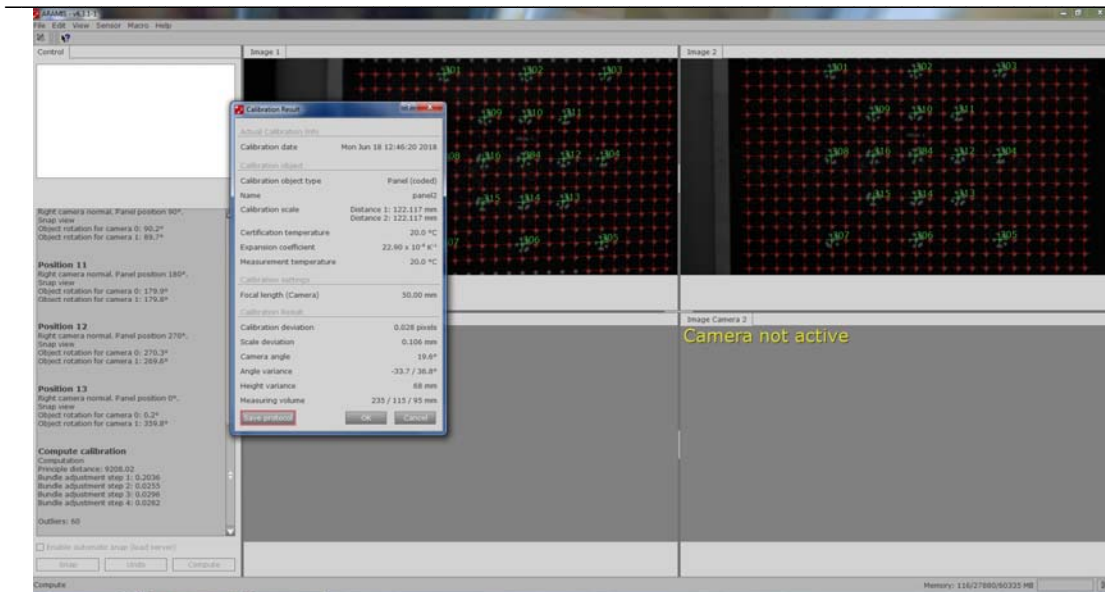


Слика 4.3. Калибрационе плоче

Према процедури, калибрациона плоча се поставља у 13 различитих положаја и усмерености ка камерама, снима у програму PHOTRON, а затим се у софтверу ARAMIS подаци обрађују и прави калибрациони фајл (слика 4.4). За исправну калибрацију софтвер мора у сваком кораку да препозна и нумерише референтне тачке на калибрационој плочи.

За тачну калибрацију, одступање мора бити између 0.01 и 0.04 пиксела, а затим се утврђује калибрациона запремина у којој се објекат може померати и мерити. Велико одступање указује на погрешну, оштећену калибрациону плочу или нетачне параметре размере. Након поступка калибрације, у овом експерименту, за алуминијумску плочу, одступање је износило 0.028 пиксела са мерном запремином од $(235 \times 115 \times 95)$ mm.

Глава 4: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика алуминијумске плоче пре и након оштећења



Слика 4.4. Калибрациони фајл

Софтверско подешавање параметара и обрада резултата

Софтвер региструје деформацију узорка помоћу слика малих површина – „фасета“. Из сваке „фасете“, после прорачуна, настаје тачка мерења. За прорачун деформације, софтвер користи две методе: прорачун линеарне деформације и параметарску методу за прорачун деформације. Почетна тачка је мала површина од које почиње прорачун и која се дефинише након што су све слике снимљене левом и десном камером на различитим степенима оптерећења узорка. Непосредно пред почетак прорачуна, неопходно је дефинисати област процесирања (прорачунску маску). Прорачунска маска омогућава програму да изведе прорачун „фасета“ у дефинисаним областима слика са дводимензионалних камера. Слике су издељене на мале површине, најчешће квадратног или правоугаоног облика где нека препоручена вредност димензија износи (19×15) пиксела. Систем одређује дводимензионалне координате „фасета“ а затим се коришћењем поступка мерних слика, 2D координате изабране „фасете“ посматране левом камером и 2D координате исте „фасете“ посматране десном камером, доводе до заједничке 3D координате, чиме је омогућен тродимензионални приказ резултата. Почетну тачку је могуће дефинисати ручно (мануелно) или аутоматски, при чему софтвер прати њено померање током прорачуна.

Само мерење, односно снимање одзива структуре је трајало $T = 1.3$ s са учестаношћу од 3000 fps. Снимање је започето мало након механичког удара који је изведен модалним чекићем (слободно осциловање плоче са једном укљештенем ивицом) у циљу добијања високо фреквентних модова који се брзо пригушују. Биране су тачке побуде на различитим позицијама плоче, док није пронађена позиција која је дала најбољи одзив и вредности сопствених фреквенција. Као најбоља локација побуде, показала се тачка на другој, доњој половини плоче, негде у средишњем делу. Изабране димензије „фасете“ су износиле (16×12) пиксела због мале површине обраде и прорачуна. Вредности померања добијене у сваком временском тренутку (сви сакупљени подаци у једном временском тренутку ће бити означени „стејџ“) креирају криву деформације, односно померања у правцу z-осе у временском домену. Дијаграме померања сваке тачке је могуће Фуријеовим трансформацијама превести у фреквентни домен и добити одговарајуће вредности сопствених фреквенција, односно модова осциловања. Висока прецизност мерења у ARAMIS софтверу помоћу добијених померања сваке слике, омогућава добијање и израчунавање тачних сопствених фреквенција испитане плоче.

4.3 Нумеричка симулација

CAD програм који је коришћен за моделирање је софтвер са интегрисаним модулима који омогућавају параметраски дизајн делова, њихов прорачун и израду потребне документације. Развијени модели у овом софтверу представљају основу за прорачун чврстоће и динамичког понашања структуре. Прорачун механичких особина структуре захтева претходно моделирање у CAD софтверу који представља геометријску основу за даље карактерисање структуре помоћу модула модалне анализе, у оквиру којег се методом коначних елемената омогућује прорачун тражених структуралних параметра и понашања структуре при задатим оптерећењима. Прорачун је изведен у програмском пакету ANSYS, а вредности сопствених фреквенција одређене су у модулу модалне анализе.

Виртуелна геометрија у потпуности одговара тестираној структури. Изабрани материјал је алуминијум следећих карактеристика: модул еластичности износи $E = 71000$ МПа и Поасонов коефицијент износи $\nu = 0.33$. Плоча је по једној

Глава 4: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика алуминијумске плоче пре и након оштећења

ивици укљештена, и урађена је модална анализа за слободно осциловање структуре. У циљу поједностављења, облик плоче је замењен генерисаном мрежом правилних призматичних елемената. Густина мреже је контролисана бројем елемената дуж три спољашње ивице. Студија конвергенције мреже је приказана у циљу процене тачности и промене нумеричких резултата са променом густине мреже, табеле 4.1 и 4.2. Колона са бројем елемената даје информацију о броју елемената дуж плоче (ширина, дужина и висина елемента мреже). Удвостручавањем броја елемената у сваком наредном кораку, прецизност прорачуна се повећава и вредности сопствених фреквенција почињу да конвергирају. На тај начин је било могуће донети закључак да даља подела мреже није неопходна јер након треће поделе елемената, не долази до неких значајних промена и одступања од емпиријских резултата.

Табела 4.1. Прве 4 сопствене фреквенције здраве плоче добијене у зависности од различите поделе мреже

Број елемената по ивицама	ν_1 [Hz]	ν_2 [Hz]	ν_3 [Hz]	ν_4 [Hz]
4×18×1	13.69	85.62	119.20	240.34
8×36×2	13.60	85.04	118.44	238.71
16×72×4	13.58	84.95	118.33	238.46
32×144×8	13.58	84.94	118.31	238.42

Табела 4.2. Прве 4 сопствене фреквенције оштећене плоче добијене у зависности од различите поделе мреже

Број елемената по ивицама	ν_1 [Hz]	ν_2 [Hz]	ν_3 [Hz]	ν_4 [Hz]
4×18×1	12.80	84.78	108.63	232.80
8×36×2	12.66	84.14	107.94	230.59
16×72×4	12.63	84.05	107.81	230.20
32×144×8	12.63	84.06	107.82	230.19

4.4 Дискусија резултата

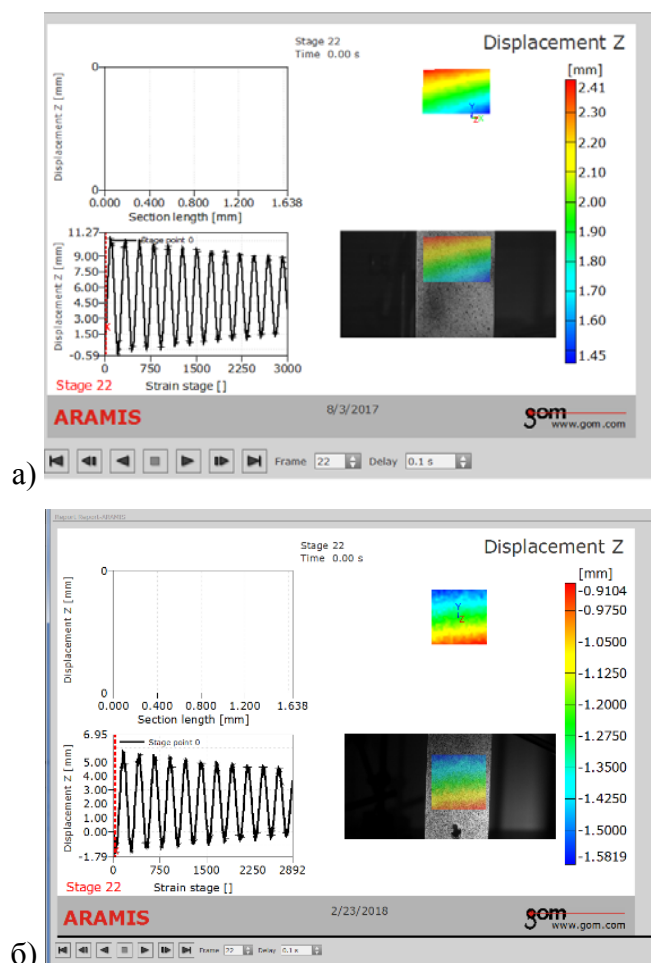
Након експерименталног испитивања, резултати су упоређени са резултатима добијеним нумеричком методом у програмском пакету ANSYS,

Глава 4: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика алуминијумске плоче пре и након оштећења

модулу модалне анализе. Добијени одзив померања у временском домену је поступком Фуријеових трансформација преведен у фреквентни, а затим су изведене експерименталне вредности сопствених фреквенција упоређене са нумеричким.

4.4.1 Експеримент

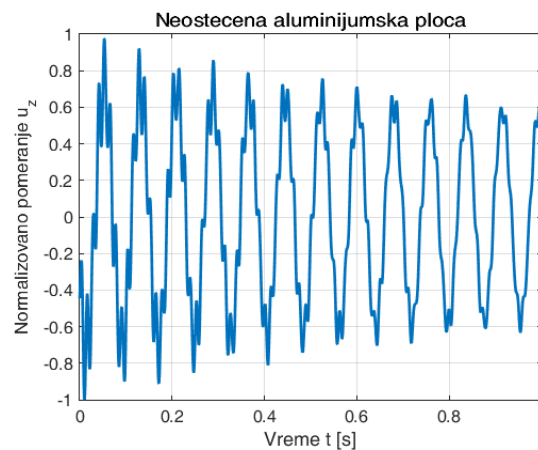
Слика 4.5 илуструје обраду снимљених слика у ARAMIS софтверу. Сваки сет слика (са леве и десне камере) коресподентан је са одговарајућим стејџом. Резултујуће померање у z-правцу (дуж најмање димензије плоче) измерено у једном временском тренутку у глобалном координатном систему контролне запремине и на изабраном делу површине плоче је обојено. Плава боја одговара најмањим, а црвена највишим измереним вредностима. Графици у доњем левом делу слике приказују добијене дијаграме одзива у временском домену.



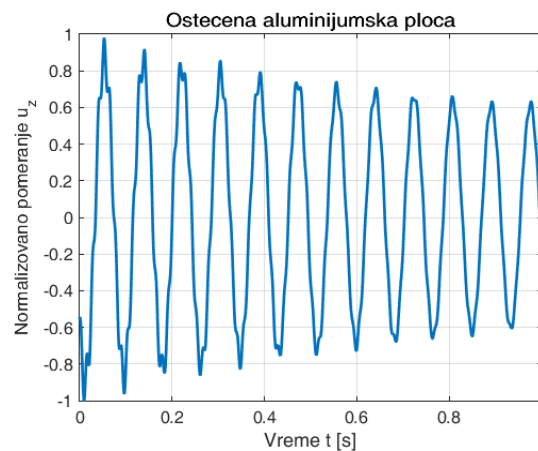
Слика 4.5. Анализа у ARAMIS софтверу; а) здрава; и б) оштећена плоча

Глава 4: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика алуминијумске плоче пре и након оштећења

Након тога су анализиране најрепрезентативнији дијаграми одзива, слике 4.6-7. Комплексан облик осциловања се појављује као резултат побуде структуре. Суперпозиција неколико првих сопствених модова је јасно приказана на сликама, за здраву и оштећену плочу. Помоћу добијених експерименталних вредности методом корелације дигиталних слика, и након неопходних Фуријеових трансформација, било је могуће одредити вредности прве три сопствене фреквенције, које су приказане на сликама 4.8-9, такође за здраву и оштећену плочу. Изражени пикови у амплитудама осциловања означавају вредности сопствених фреквенција. Током испитивања, приликом побуђивања структуре, вршене су различите пробе одабира тачке саме побуде где се дошло до закључка, да управо локација и место удара имају велики утицај у одређивању и „хватању“ сопствених фреквенција.

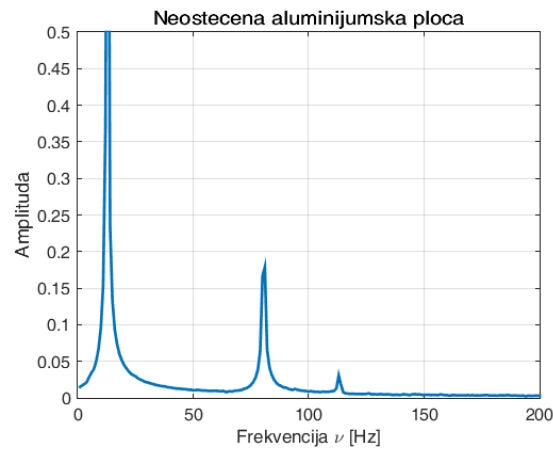


Слика 4.6. Одзив здраве плоче у временском домену

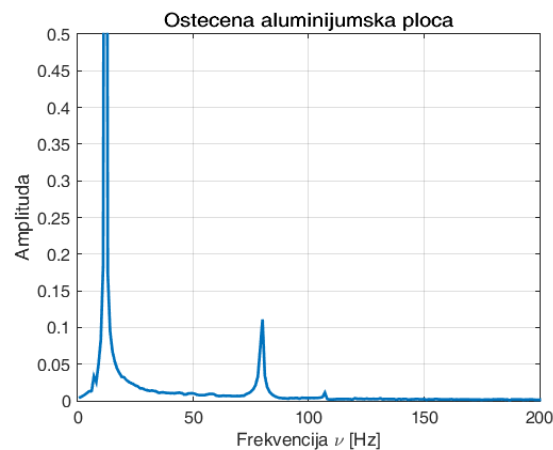


Слика 4.7. Одзив оштећене плоче у временском домену

Глава 4: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика алуминијумске плоче пре и након оштећења



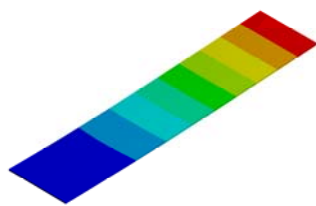
Слика 4.8. Одзив здраве плоче у фреквентном домену



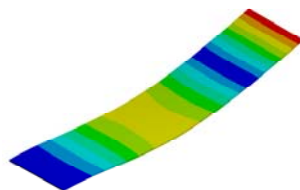
Слика 4.9. Одзив оштећене плоче у фреквентном домену

4.4.2 Нумерички резултати

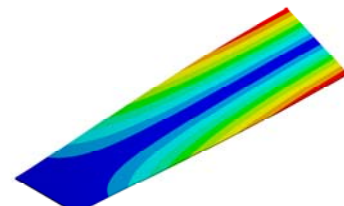
Нумеричка симулација није ограничена одзивима у реалном временском домену и као резултат може се приказати неограничен број сопствених модова. На сликама 4.10-11 илустровано је првих шест модова за обе плоче, здраву и оштећену.



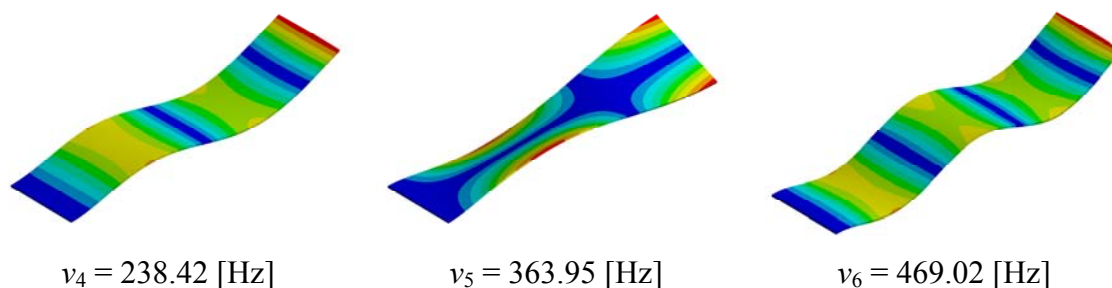
$$\nu_1 = 13.58 \text{ [Hz]}$$



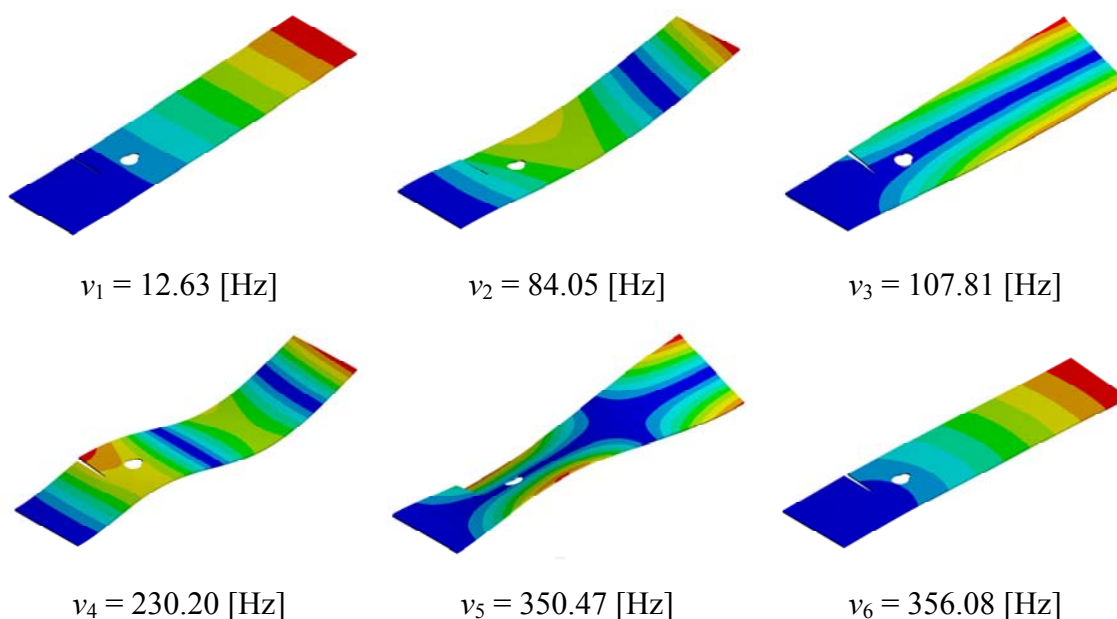
$$\nu_2 = 84.94 \text{ [Hz]}$$



$$\nu_3 = 118.31 \text{ [Hz]}$$



Слика 4.10. Добијени облици осциловања здраве плоче; модови савијања су 1, 2, 4. и 6; а увијања су 3. и 5.



Слика 4.11. Добијени облици осциловања оштећене плоче; модови савијања су 1, 2, и 4; увијања су 3. и 5; 6. мод одговара савијању у равни плоче

4.4.3 Дискусија

Табела 4.3 приказује све анализирани резултате, експерименталне и нумеричке, који одговарају здравој и оштећеној плочи. Одступања која се јављају између експерименталних и нумеричких вредности могу се делимично објаснити нерегуларностима стварне структуре, а које није могуће симулирати нумерички идеалном геометријом (нпр. идеално равне ивице, униформност материјала итд). Задата структурална оштећења доводе до смањења вредности прве три сопствене фреквенције. Промене у вредностима сопствених фреквенција су јасно уочљиве и првим савојним и торзионим модовима.

Глава 4: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика алуминијумске плоче пре и након оштећења

Табела 4.3. Поређење прве 3 сопствене фреквенције, здраве и оштећене плоче добијене експерименталном и нумеричком методом

Мод	Метод	Здрава	Оштећена
ν_1 [Hz]	експериментални	13.0±0.5	12.0±0.5
	нумерички	13.58	12.63
ν_2 [Hz]	експериментални	81.0±0.5	80.0±0.5
	нумерички	84.94	84.06
ν_3 [Hz]	експериментални	113.0±0.5	107.0±0.5
	нумерички	118.31	107.82

Када се упореде експерименталне са нумеричким вредностима фреквенција здраве структуре, уочава се тенденција раста девијације између два низа резултата ($\Delta\nu_1 \approx 0$ Hz, $\Delta\nu_2 \approx 3$ Hz, $\Delta\nu_3 \approx 5$ Hz, итд). У случају оштећене плоче, то није случај, већ се највећа девијација јавља у другом моду савијања ($\Delta\nu_2 \approx 3$ Hz). Међутим, релативно одступање између експерименталних и нумеричких резултата је мање од 5% за све анализирани модове што је прихватљиво јер се налазе унутар граница инжењерске примене.

Иако је поступак испитивања приказан и тестиран на једноставној геометрији и униформној структури, алуминијумској плочи, добијени резултати потврђују да се ова метода може применити на широк спектар структура због своје ефикасности и знатно краћег времена мерења. У наредном поглављу, овај поступак експерименталног испитивања биће примењен на одређивање сопствених модова осциловања код композитних структура, које се и користе при изради рамењача лопатица ротора ветротурбина.

Глава 5

Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

5.1 Увод

У овој глави биће приказане композитне структуре и њихова примена на ветроенергетским системима. Композитне лопатице ротора ветротурбина представљају великогабаритне структуре и услове за њихово испитивање је тешко обезбедити. Међутим, њихово испитивање, у овом случају одређивање динамичких карактеристика, је могуће извести и на структурама мањих димензија а које са довољном прецизношћу дају податке и информације о понашању читаве конструкције. Плоче направљене од идентичног композитног материјала као и сама лопатица, су експериментално испитане већ поменутом методом за дигиталну корелацију слике, при чему су добијене сопствене фреквенције пре и након оштећења дале увид у потпуно стање читаве конструкције, као и могућност даљег предвиђања радног века лопатице ветротурбине.

Визије о даљем развоју ваздухопловства и индустрије ветротурбина су различите, али је за даљи, видљиви напредак потребан нови продор у развоју технологија. У блиској будућности највећи допринос се може очекивати од

развоја и примене нових генерација материјала. Под новим и напредним материјалима се подразумевају пре свега композитни материјали чији развој и примена све више постају заступљени у светској производњи ваздухоплова и ветротурбина.

Напредни композитни материјали високих механичких и физичких карактеристика први пут су постали доступни пре више од три деценије. Од тада су ваздухопловне структуре израђене од композита прешле пут од лабораторијског експеримента до ниско-ризичне, квалитетне и лаке алтернативе за металне структуре.

Композитне структуре као спој два или више материјала различитих особина на макроскопском нивоу, поседују значајно боље структурне, термалне и остале особине од карактеристика саставних компоненти. На тај начин, комбинацијом различитих врста ојачања и матрица могу се добити потпуно нови напредни материјали у циљу побољшања перформанси и карактеристика структуре од композитних материјала.

5.2 Композитне структуре

Као и велики број других напредних открића и достигнућа, тако је и напредак технологије у области материјала кренуо подстакнут развојним потребама у војној и у индустрији наоружања; да би временом најкорисније и најпотребније технологије пронашле употребну вредност и у индустрији широке потрошње. Ово је био случај и са динамичним развојем конструктивних материјала, па и композита који је започет шездесетих година 20. века, када је трка за освајањем свемира доминирала готово свим аспектима истраживања и развоја.

Композити који се користе као конструкциони материјали најбоље се категоризују као композити високих перформанси. Најчешће су направљени од синтетичких материјала са великим односом чврстоће према тежини и захтевају строго контролисане услове производње, како би се оствариле оптималне и тражене карактеристике.

Композитни материјали се одликују трајношћу, малом осетљивошћу на замор, отпорни су на хабање, поседују ниску топлотну и акустичну проводљивост,

и добре пригушне карактеристике. Особина композита је да су анизотропни материјали и то се користи за побољшање перформанси композитних компоненти. Све наведене предности композитних материјала имају посебан значај код елемената типа лопатица ротора и елиса. Ове компоненте захтевају управо велики однос чврстоћа/маса, отпорност на вибрације и замор.

Карактеристике материјала се могу мењати не само променом хемијског састава или микроструктуре, већ и променом макроструктуре одређеног материјала. Под композитним материјалима подразумевамо материјале који су добијени сједињавањем два или више материјала различитих особина на макроскопском нивоу без разарања у нераздвојиву везу. Такви материјали поседују значајно различите структурне, термалне и остале особине од особина саставних материјала. Карактеристике новонасталог материјала не зависе само од материјала матрице и испуне, већ и од тога у ком су односу заступљени међусобно као и какав је геометријски распоред и облик испуне у матрици. Савремени композити садрже две фазе. Прва фаза је материјал чвршћи и крући од другог материјала – друге фазе која се назива *матрица*. Први материјал се назива *ојачивач* или *армирајући материјал* и с обзиром да се налази унутар матрице, која представља везивно средство, назива се још и *пунилац* или *испуна*. Испуна највише утиче на механичке карактеристике крутости и чврстоће и код ламинарних композита је облика влакана. С друге стране, матрица врши преношење оптерећења на влакна, штити влакна од спољашњих утицаја (механичких утицаја, УВ зрачење, влаге), и од ње првенствено зависе особине композита, као што су хемијска постојаност, отпорност на високе температуре, удар, замор и пузање. Код савремених композита постоји широк спектар комбинација материјала и облика који се употребљавају за матрицу-испуна. Матрице могу бити израђене од метала, керамике и разних врста смола. Испуна с друге стране такође може бити од различитог материјала али и разноврсног облика и распореда унутар матрице. На основу наведених елемената може се вршити класификација композитних материјала.

При спајању компоненти композитног материјала, делују кохезионе и адхезионе силе којима се обезбеђује чврстоћа споја (квалитет ламинирања или лепљење). Нове комбинације влакана и смола, па и потпуно нови материјали, су у

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

сталном развоју. Висок однос тврдоће, односно крутости, и тежине је добро позната предност композита али није и једина.

Главне предности композита су:

- ➔ Нижа вредност тежине (висок однос јачине материјала и његове тежине)
- ➔ Карактеристике према потреби (могућност да се конструкцијом самог материјала тражене карактеристике добију у правцу дејства оптерећења)
- ➔ Дужи радни век односно могућност употребе (нема корозије)
- ➔ Нижа цена производње (мањи број делова)
- ➔ Повећана (смањена) топлотна и електрична проводљивост

Са друге стране композити показују и неке мане:

- ➔ Висока цена сирових материјала
- ➔ Лоше карактеристике у попречним правцима
- ➔ Слабе особине материјала матрице
- ➔ Мале могућности поновне употребе и рециклаже

Правилним пројектовањем и избором материјала матрица и влакана наведене мане могу се премостити и свести на минимум, тако да у највећој мери, предности композитних материјала преовлађују што је довело до њихове све раширеније употребе. Композитни материјали су мешавина два или више материјала – компоненти, уређених тако да је једна (или више) прекидних, неконинуалних фаза укључена у непрекидну фазу. Прекидна фаза представља ојачање матрице или калупа који представља непрекидну фазу. Ојачање је у највећем броју случајева знатно снажније – тврђе и круће од материјала матрице. Да би се формирао композит неопходне су оба саставна дела (и матрица и ојачање) који би требало да испуне специфичне захтеве уколико се жели да пројектована композитна структура има тражене карактеристике и понаша се у складу са предвиђањима и очекивањима.

У општем случају материјал је јачи у облику влакана него у великим комадима. Број микроскопских грешака и иницијалних прскотина које увек постоје у великим комадима знатно опада када се користи материјал у мањим (тањим) секцијама. Када се користи у облику влакана материјал ће имати мали

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

број грешака од којих би могле настати прскотине које би током радног века довеле до лома. Тиме је јачина и отпорност влакна већа него великог комада материјала. Појединачна влакна је тешко контролисати и користити због чега су неопходне матрице (калупи) без којих би се влакна у композиту уврнула и замрсила. Везивни материјал (материјал матрице) мора бити непрекидан да би могао да окружи свако појединачно влакно и тако их држи одвојено од суседних влакана. Физичка и механичка својства композита директно зависе од особина, геометрије и концентрације конституентних материјала. Повећање запреминског удела материјала који представља ојачање даће као резултат повећање тврдоће и крутости али само до одређене границе. Уколико је то повећање запремине прекомерно доћи ће се у ситуацију да је садржај ојачања толико велики да неће бити довољно материјала матрице да издвоји појединачна влакна, па ће се она међусобно заплети. Такође, геометрија сваког појединачног влакна ојачања и њихов распоред у матрици утичу на карактеристике добијеног композита. Стога велики број фактора мора бити узет у обзир приликом пројектовања композита: тип ојачања матрице, геометријски распоред и запремински удео сваког конституентног материјала, претпостављена спољна оптерећења, услови у којима ће материјал бити употребљаван итд. Када је реч о анализи особина и понашања под дејством оптерећења, испитивање композита започиње успостављањем основних веза и релација између напрезања и деформација као и код хомогених изотропних материјала. Претпоставка је да су изотропни, хомогени материјали (челик, алуминијум...) униформни по целој својој запремини и да имају исте еластичне особине у свим правцима. При дејству силе затезања изотропан материјал се деформише као што је то приказано на слици 5.1 (испрекиданом линијом представљен је облик недеформисаног узорка).



Слика 5.1. Понашање изотропних, анизотропних и ортотропних материјала при дејству силе затезања

За разлику од конвенционалних машинских материјала композити су нехомогени и не понашају се као изотропни материјали. Већина композита се понаша као анизотропни или ортотропни материјали.

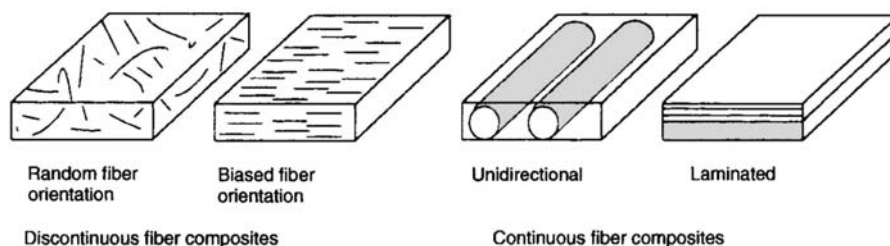
Особине анизотропних материјала су различите у различитим правцима. При дејству силе затезања долази до деформације настале као слагање издужења и деформације настале смицањем. Због различитог степена анизотропног понашања материјала, стварна деформација директно зависи од особина материјала који се посматра. Особине ортотропног материјала су различите у три, међусобно управна правца али за разлику од анизотропних материјала, деформација која се јавља под дејством оптерећења није резултат слагања деформација. Деформације у попречним правцима, за разлику од изотропних материјала, нису исте због различите вредности Поасоновог коефицијента у посматраним правцима, тј. узорак ће се под дејством оптерећења више деформисати у једном од посматраних праваца. Када се матрица и влакна укомпонују, и тако формирају композитни материјал, задржавају своје особине и карактеристике које директно утичу на карактеристике композита. Материјал добијен на овај начин биће састављен од слојева влакана (ламината) и матрице са траженим карактеристикама у једном или више праваца.

Класификација и подела композитних материјала

Композитни материјали се најчешће деле према типу ојачања који се употребљава. Два највеће групе су „влакнасти“ и „честични“ композитни материјали.

„Влакнасти“ композитни материјали: Влакнасти композити се састоје или од континуалних (дугих влакана) или исецканих (власи) влакана распоређених у материјалу матрице. И дуга влакна и власи се могу препознати са геометријске тачке гледишта:

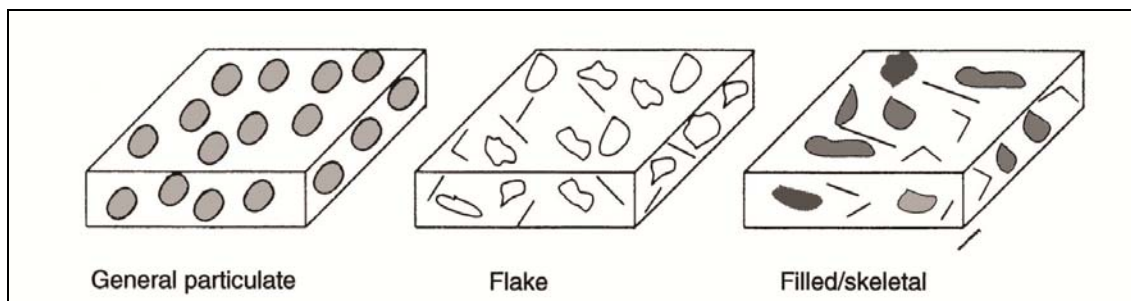
- ➔ Континуална влакна имају велики однос дебљине и дужине влакна. Пречник влакна, у зависности од употребљеног материјала, креће се од 3 до 200 μm .
- ➔ Власи су кратка влакна пречника 0.02-100 μm са односом дужине и пречника влакна $5 < l/d < 1000$.



Слика 5.2. Приказ влакнастих композитних материјала

Композити код којих су ојачања у облику дугих влакана или власи могу бити произведени тако да влакна буду са насумичном или унапред строго одређеном оријентацијом, слика 5.2. Композити са насумичним распоредом ојачања сматрају се једнослојним композитима а њихово понашање блиско је анизотропним материјалима, иако се у неким случајевима догађа да произведени материјал са насумичним распоредом влакана буде готово изотропан. Једнослојни композити са континуалним влакнима могу бити са једносмерним или сатканим влакнима. Вишеслојни композити често се називају и ламинати. Понашање композита ојачаних континуалним (дугим) влакнима је слично ортотропним материјалима.

„Честични“ композитни материјали: Честични композити се категоризују као материјали састављени од ситних делића распоређених у материјалу матрице. Делићи могу имати потпуно произвољан облик и величину. Постоје две основне подгрупе „честица“ (делића): пахуље и испуњени скелети, слика 5.3.



Слика 5.3. Приказ честичних композита

Пахуље. Композитни материјал са „пахуљама“ састављен је од делића чија је површина знатно већа од дебљине а који су распоређени у материјалу матрице.

Испуњени скелети. Композит са оваквим делићима састављен је од непрекидне, „скелетне“ матрице која је испуњена другим материјалом (нпр. саћаста структура са испуном).

Честични композитни материјали понашају се слично анизотропним или ортотропним материјалима. Ова врста материјала се углавном користи када јачина материјала није најбитнија захтевана карактеристика.

5.2.1 Структура композитних материјала

Композит је материјал који се састоји од два или више саставних материјала или њихових фаза. Један материјал представља непрекидну фазу – матрицу или калуп, док је други материјал ојачање или испуна.

Матрице

Матрица (калуп) представља везивни материјал у композиту чији је задатак:

- ➔ Да раздваја влакна и ојачава их на задатом месту у структури композита
- ➔ Да штити влакна у структури композита од спољних утицаја и оштећења
- ➔ Да помогне у преношењу оптерећења на влакна и расподели оптерећења између влакана
- ➔ Да контролише електричне и хемијске особине композита
- ➔ Носи напоне смицања који се јављају између слојева ојачања

Жељене карактеристике матрица, у зависности од намене за коју ће посматрани композит бити коришћен су:

- ➔ Минимална апсорпција влаге
- ➔ Мало скупљање
- ➔ Добро квашење и везивање влакана
- ➔ Мали коефицијент топлотног ширења
- ➔ Разумљиво добре физичке и механичке карактеристике

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

-
- Еластичност која ће омогућити преношење оптерећења
 - Добре карактеристике на повишеним (сниженим) температурама (у зависности од намене)
 - Лака обрадивост
 - Димензиона стабилност (задржавање облика под дејством оптерећења)

Физичке и механичке карактеристике композита заснивају се на карактеристикама влакана. Најчешће, материјал матрице је мање густине и слабијих механичких особина (тврдоће и крутости) од материјала влакана па је матрица „слаба“ карика и у њој прво долази до појаве прскотине и оштећења. На овај проблем се може утицати избором материјала матрице. Најчешће употребљаване матрице су:

- Органске (смоле),
- Металне,
- Угљеничне и
- Керамичке.

Органске матрице

Матрице од органских (полимерних) материјала су најчешће коришћене у изради композита. Органски материјали се могу лако обрађивати (и на нижим температурама), имају добре механичке особине, добро квасе влакна ојачања, мале су густине и обезбеђују добро спајање. Могу се наћи у природи у облику смола. Матрице од органских материјала (смола) могу се сврстати у две групе:

- Термореактивне и
- Термопластичне.

У поређењу са термопластичним матрицама, термореактивне матрице су јефтиније и једноставније за обраду, док, са друге стране, термопластичне матрице нуде неограничен радни век, једноставнију фабрикацију и не захтевају контролисане услове за складиштење и обраду.

Основне особине, предности и мане термореактивних и термопластичних матрица приказане су у табели 5.1.

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

Табела 5.1. Особине, предности и мане термореактивних и термопластичних матрица

Термореактивне матрице	Термопластичне матрице
<i>Особине</i>	
<ul style="list-style-type: none"> → При третирању долази до хемијских промена → Обрада/прерада је неповратна → Мала вискозност → Дуго време обраде 	<ul style="list-style-type: none"> → При третирању нема хемијских реакција → Поновна обрада и прерада могућа → Велика вискозност → Кратко време обраде
<i>Предности</i>	
<ul style="list-style-type: none"> → Ниске температуре обраде → Добро квашење влакана → Могуће израда компликованих облика → Мала вискозност 	<ul style="list-style-type: none"> → Супериорна чврстоћа → Могућност прераде остатака → Могућност дораде-прераде лоших делова → Брза обрада → Неограничен радни век → Висока отпорност на деламинацију
<i>Мане</i>	
<ul style="list-style-type: none"> → Дуго време обраде → Строги услови складиштења 	<ul style="list-style-type: none"> → Слабија хемијска отпорност → Високе температуре обраде

Термореактивне матрице

Термореактивне органске матрице доминантне су у индустрији композита због своје реактивне природе, и што омогућавају:

- једноставнију импрегнацију влакана,
- израду компликованих форми због своје растегљивости и савитљивости,
- постизање високе чврстоће и крутости.

Из групе термореактивних матрица у најширој примени су матрице од:

- епоксида,
- полиамида,
- полиестера и

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

→ фенола.

Основне особине термореактивних матрица дате су у табели 5.2.

Табела 5.2. Поређење основних карактеристика основних термореактивних матрица

Особина	Епоксид	Полиестер	Фенол	Полиамид
Обрадивост	добра	добра	просечна	слаба/тешка
Механичке особине	одличне	просечне	просечне	добре
Топлотна отпорност	93°C	85°C	175°C	260°C-315°C
Отпорност на деламинацију	добра	задовољавајућа	добра	добра
Чврстоћа	просечна/добра	слаба	слаба	просечна
Цена	ниска/средња	ниска/средња	средња/висока	висока
Напомена	Најшира примена. Користи се и за носеће структуре	Користи се за секундарне структуре	Користи се за секундарне структуре	Користи се за високе температуре

(категоризација: Одличан – добар – просечан – слаб)

Епоксиди. У складу са хемијском праксом молекули се могу класификовати према функционалним групама које садрже. Према томе епоксидима се сматрају сва једињења чији молекули у себи садрже епоксидну групу.

Системи засновани на епоксидној бази су главни композити за употребу на ниским температурама (углавном испод 93°C) и обезбеђују изванредну хемијску отпорност, супериорно везивање за влакна, одличну димензијску стабилност, добре карактеристике у топлим и влажним условима рада и високе диелектричне особине. Епоксиди могу бити формулисани за велики распон вискозности и на тај начин прилагођени за различите процесе производње и хемијског третирања.

Епоксиди имају дуг радни век, мало се издужују прииком третирања, имају одличне карактеристике пријањања, добру хемијску стабилност и стабилност у екстремним условима околине, добре особине течења, добру отпорност на воду и а у њима нема испарења која би могла изазвати формирање празнина (мехурова) у матрици. Епоксидне матрице су погодне за комбиновање са ојачањима од стакла, угљеника (графита), арамида, бора као и другим, хибридним ојачањима. Да би се испунили све строжи захтеви који се постављају пред савремене генерације композита, епоксиди се модификују како би задовољили потребе већих брзина производње, повећане чврстоће и повишених температура употребе. Немодификовани епоксиди су крти. Када су изложени удару страног тела могу претрпети унутрашња оштећења која могу изазвати губитак притисне чврстоће у ламинатним слојевима. Због тога епоксиди се модификују како би им се повећала отпорност на оштећења, а резултат су тзв. „ојачани“ епоксиди. Епоксиди имају тенденцију упијања влаге што може довести до деградације њихових механичких карактеристика, посебно на повишеним температурама. Стога и овом ефекту мора бити посвећена пажња приликом пројектовања материјала. Услови околине који, поред влаге и повишене температуре могу имати штетан утицај на епоксидне матрице су и: ултраљубичасто зрачење, гориво, хидрауличко уље као и средства за чишћење.

Полиамиди (смоле за високе радне температуре). Полиамиди су термо-оксидативно стабилни и задржавају висок степен својих механичких карактеристика на температурама знатно вишим од температуре деградације највећег броја полимера, често и преко 320°C.

Полиестери. Полиестерске матрице могу се третирати у различитим условима – од собне температуре и атмосферског притиска до температура од 177°C на повишеном притиску. Употреба матрица од полиестера нуди равнотежу ниске цене и лаког руковања са добрим механичким и електричним карактеристикама, добром хемијском отпорношћу (нарочито на киселине) и димензионом стабилношћу. У комбинацији са стакленим влакнима полиестер постаје материјал пропустљив за радарске таласе. Цена полиестера није велика а његова обрада је релативно лака и брза па материјали на бази матрица од полиестера имају широку примену у изради авионских радова, пре свега.

Винил-естерске смоле су полиестерска подгрупа која обезбеђује већу тврдоћу, бољу хемијску и топлотну отпорност од стандардних полиестера.

Феноли. Матрице од фенолних смола су најстарије терморективне матрице у употреби. Добре особине фенола су: отпорност на влагу, електричне особине (добар изолатор), хемијска отпорност (осим на изузетно јаке киселине и алкале). Композити на бази фенола су погодни за примену код којих је димензиона стабилност на повишеним температурама и при већим оптерећењима од пресудног значаја за оперативност посматране компоненте.

Ојачања (vlakna)

Своје добро избалансиране карактеристике, композити дугују комбинацији матрица и ојачања. Првенствена улога влакана је ношење оптерећења па су ојачања одговорна за добре механичке особине материјала: затезну, притисну и савојну чврстоћу. У зависности од потреба и очекиваних карактеристика пројектованог композита могу се употребљавати влакна различитих дужина и облика. Непрекидним влакнима се сматрају она код којих је дужина знатно већа од пречника, $5 < l/d < 1000$. Употреба кратких (прекидних) влакана омогућује једноставнију, бржу и економичнију производњу и обраду, израду компоненти сложеног облика и њихову високу геометријску тачност; али су она због својих слабијих механичких карактеристика знатно мање употребљавана. Што се облика тиче – готово сва влакна која су нашла примену у композитима употребљаваним у ваздухопловној индустрији су чврста и кружног попречног пресека. У скорије време развијена су и шупља влакна (цеви), која су у испитивањима показала обећавајуће карактеристике, пре свега врло добру притисну чврстоћу.

У изради композитних материјала највише су заступљена:

- Органска,
- Керамичка и
- Метална влакна.

Стандардне димензије неких од најчешће коришћених влакана приказане су у табели 5.3.

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

Табела 5.3. Димензије армирајућих влакана

Материјал	Број нити	Површина влакна (мм ²)	Пречник попречног пресека влакна (мм)	Маса влакна (кг/км)
Угљеник (Херцулес АС4) Д=7.1μм ρ=1850кг/м ³	3000	0.12	0.45	0.221
	6000	0.24	0.64	0.442
	12000	0.48	0.90	0.884
	30000	1.19	1.42	2.211
	75000	2.98	2.25	5.533
Угљеник (Херцулес ИМ6) Д=5.6μм ρ= 1800кг/м ³	3000	0.07	0.35	0.132
	6000	0.15	0.50	0.264
	12000	0.29	0.71	0.530
	30000	0.74	1.12	1.322
	75000	1.84	1.77	3.311
Арамид (ДуПонт Кевлар49) Д=11.9μм ρ= 1440кг/м ³	1000	0.11	0.44	0.160
	2000	0.22	0.62	0.322
	3000	0.34	0.75	0.483
	4000	0.45	0.87	0.644

Органска влакна

Органска влакна нуде исте предности као и органске матрице – малу тежину и велику чврстоћу. У групу органских влакана спадају:

- Стаклена,
- Угљенична,
- Арамидна,
- Полиетиленска влакна.

Стаклена влакна (фиберглас). Развој стаклених влакана и технологија везаних за њих представљају почетак развоја композита у опште. Данас, стаклена влакна су највише коришћена и најшире примењивана влакна. Стаклена влакна су своју популарност стекла како ниском ценом и малом тежином тако и својом великом чврстоћом, отпорношћу на влагу и високе температуре. У ваздухопловству, композити ојачани стакленим влакнима користе се за делове и компоненте који нису изложени великим напрезањима – нпр. делови за опремање ентеријара путничких авиона, аеродинамичке облоге на крилима као и непокретни делови излазних ивица крила. Међутим, развојем технологија материјали ојачани

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

стакленим влакнима почињу да се примењују и за носеће структуре лаких и спортских авиона, али и за лопатице ротора хеликоптера и лопатице ветротурбина.

Између осталих, издвајају се два типа стаклених влакана: „E“ и „S“, карактеристике у табели 5.4. Стаклена влакна типа „E“ имају велик однос чврстоће и тежине, добру отпорност на замор, одличне диелектричне особине као и одличну хемијску и отпорност на корозију. Стаклена влакна „E“ типа на температурама од 320°C задржавају и 50% вредности своје затезне чврстоће. Ипак, њихова примена је ограничена за мало оптерећене, неодговорне („секундарне“) структуре. За захтевније услове развијена су стаклена влакна типе „S“ – влакна за висока напрезења и употребу на носећим („примарним“) структурним елементима. У поређењу са „E“, „S“ стаклена влакна имају 25% већу притисну чврстоћу, 40% већу затезну чврстоћу, 4% мању густину као и већу хемијску отпорност (пре свега на киселине). Друге врсте стаклених влакана (A, C, D) имају само ограничену примену због својих лошијих карактеристика. Развијена су и шупља стаклена влакна која се одликују добром притисном чврстоћом а углавном се користе тамо где је неопходно додатно смањење тежине.

Табела 5.4. Карактеристике „E“ и „S“ стаклених влакана

Тип влакна	Затезна чврстоћа [MPa]	Модул еластичности [GPa]	Процентуално издужење [%]	Коеф. топлотног ширења [°C ⁻¹]	Коеф. преламања
E	3448	72.4	4.8	5	1.547
S	4585	85.5	5.7	5.6	1.523

Арамидна влакна (Кевлар). Арамидна влакна дају одличну комбинацију чврстоће и особина упијања (арамидна/кевларска влакна се користе у непробојним прслуцима). Овај тип влакана се одликује и високом затезном чврстоћом – кевларска влакна су пет пута „јача“ и од челика (сведено на вредности по јединици масе).

Такође, арамидна влакна имају добру хемијску и отпорност на замор, а своје механичке и физичке карактеристике задржавају и на повишеним

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

температурама. Још једна област у којој су се кевларска влакна добро показала је и отпорност на вибрације – мање су склона појави флатера. Мана арамидних влакана је крост, мала притисна чврстоћа и тешка обрада.

Угљенична (графитна) влакна. Угљенична влакна су влакна највеће чврстоће композитних материјала данас у употреби. Оно што издваја композите ојачане угљеничним влакнима је изузетан однос чврстоће и тежине, висока крутост и мали коефицијент термалне експанзије у смеру влакана.

Табела 5.5. Поређење карактеристика угљеничних композита и класичних метала

Материјал	Затезна чврстоћа σ [GPa]	Модул еластичности E [GPa]	Густина ρ [kg/m ³]	σ/ρ [10 ⁶ m ² s ⁻²]	E/ρ [10 ⁶ m ² s ⁻²]
Thornel P100*	2.20	690	2150	1.02	321
Thornel T-40*	5.65	290	1810	3.12	160
Алуминијум	0.172	73	2720	0.063	27
Титанијум	0.324	110	4500	0.072	24
Челик	0.414	199	7860	0.052	25

* у овом поређењу коришћени су угљенични композити P100, смоластог типа, и T-40, PAN типа које производи компанија Амосо

Угљенична влакна се добијају распадањем органских влакана од полиакрилнитрита (ПАН), различитих врста смола и вештачке свиле. Сходно томе угљенична влакна се могу сврстати у три групе.

ПАН влакна. Ова влакна имају највећу чврстоћу и најбољи баланс механичких особина. У употреби су дуги низ година углавном у ваздухопловној индустрији.

Влакна на бази смола. Влакна новије генерације и мање чврстоће од ПАН влакана. Накнадним третирањем и обрадом могу им се побољшати механичке карактеристике. Сировине за добијање ових влакана су јефтине.

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

Влакна на бази вештачке свиле (рајона). Имају најслабије механичке карактеристике и готово се искључиво користе за израду авионских кочница и носних поклопаца.

У зависности од тока и процеса производње угљеничних влакана, могу се подешавати вредности модула еластичности и чврстоће. Угљенична влакна са средњим вредностима модула еластичности од 255-310 GPa обележавају се са IM. Високо модуларна угљенична влакна HM имају модул еластичности већи од 310 GPa, а са веома високим модулом еластичности UHM преко 395 GPa. Група влакана (HT) подразумева затезну чврстоћу (HS) до 3.5 GPa и њихов модул еластичности се налази у распону 200-255 GPa, табела 5.5.

Угљенични композити су знатно отпорнији на замор и вибрације од алуминијума и челика а додатна предност им је и занемарљиво ширење на високим температурама.

Керамичка влакна

За израду делова од композита са металним или керамичким матрицама радне температуре у производним процесима могу бити врло високе.

Најчешће примењивана керамичка влакна су:

- Кварцна,
- Силицијум-карбидна и
- Алумина влакна.

Кварцна влакна; могу се користити и на температурама од преко 1000°C. У поређењу са осталим влакнима за високе температуре, кварцна влакна имају и највећу затезну чврстоћу. Густина им је за 15% мања него густина стаклених влакана. У употреби су и шупља кварцна влакна са металном облогом или металном испуном.

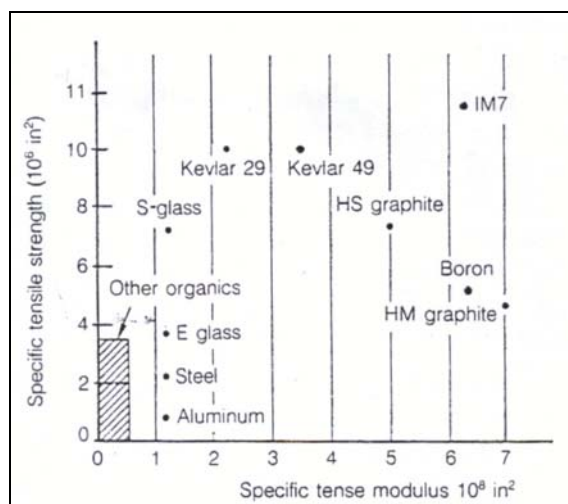
Силикон-карбидна влакна; као и кварцна, силикон-карбидна (SiC) влакна су керамичка влакна која своје механичке и физичке карактеристике задржавају и на високим температурама (до 980°C). Добре одлике SiC влакана су и добра хемијска и отпорност на корозију.

Алумина влакна; имају за 40% већи модул еластичности од SiC влакана – 380 GPa, и могу се користити у условима у којима температура достиже 980°C.

Метална (бор) влакна

Влакна бора се добијају хемијским путем – наношењем бора у гасном стању на влакно од тунгстена. Тако добијено влакно, са затезном чврстоћом од 3.4 GPa, је снажније и од угљеничних влакана. Влакна бора се могу користити као ојачања органских и металних матрица. И поред добрих механичких карактеристика композити ојачани боровим влакнима нису нашли широку примену, пре свега због високе цене производње. Проблеми се јављају и код обраде јер су материјали са боровим влакнима врло тешко обрадиви а такође су и релативно велике дебљине.

Поређење карактеристика различитих врсти влакана приказано је на слици 5.4 и у табели 5.6.



Слика 5.4. Поређење специфичних затезних чврстоћа

Табела 5.6. Основне механичке карактеристике влакана

	Угљеник	Стакло			Бор	Арамид
		Е	Р	С		
Модул еластичности у подужном правцу Е [GPa]	160-830	81	86	88	280-420	83-190
Затезна чврстоћа σ_{max} [GPa]	1.4-5.6	3.8	4.4	4.6	2.1-5.7	3.1-4.1
Издужење до лома ϵ [%]	0.3-1.81	4.7	5.1	5.2	<1	2.0-4.4
Коефицијент термичког ширења α [$10^{-6}/K$]	-0.5 - -1.6	5.4	4	1.6	4.5-5.4	-3.6 - -6.3
Густина ρ [kg/dm ³]	1.69 - 2.18	2.54	2.55	2.49	2.5-2.6	1.38-1.49

5.2.2 Технологија израде композитних материјала

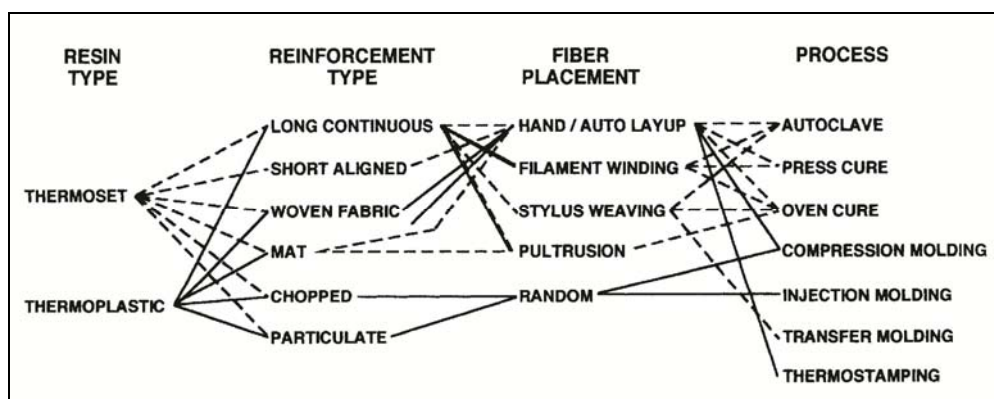
С обзиром да композитни материјали у току свог обликовања у готове производе често попримају облике различитог агрегатног стања, то они за своје дефинитивно структурно обликовање, полимеризацију и очвршћавање захтевају одређене, тачно прописане, често и врло сложене поступке температурног третирања под дејством притиска или вакуума у строго дефинисаним временским интервалима њиховог деловања, као и њиховим толеранцијским пољима и градијентима промене. Ове, строге поступке третирања дефинише произвођач сирових, конституентних материјала, али и сам корисник на основу сопственог искуства стеченог у раду са овим материјалима и на бази резултата испитивања која се обављају широм света а чији се резултати презентују у стручној, наменској литератури.

Процеси третирања највише зависе од употребљеног материјала матрице, односно материјала ојачања и форми у којој су сировине испоручене, који опет зависе од примењеног поступка, броја комада, потребних механичких карактеристика и намене дела који се израђује. У ваздухопловној индустрији највише се користе поступци који се због своје специфичности, условима под којим се изводе као и употребљених материјала могу поделити у неколико особених група које захтевају сличне сировине, структурне карактеристике, технолошке поступке за њихову израду па самим тим и сличне услове њиховог третирања. Израда структуре авиона, израда лопатица ротора ветротурбина, израда калуца и израда делова намотавањем, само су неки специфични процеси примењени у ваздухопловној и индустрији ветротурбина за израду делова и производа од композитних материјала. Компоненте се углавном израђују од полуфабриката у облику ламинатних структура који представљају унапред припремљену комбинацију матрице и влакана. Димензије и геометрија дела које би требало направити основни су параметри за избор технолошког процеса израде, као и материјал од кога се тражени део производи. Када се ради о изради композитних структура утицај материјала добија нову димензију због различитих природа и особина конституентних композита.

Код структура високих перформанси, користе се искључиво композитни материјали са дугим (непрекидним влакнима). Композити овог типа се добијају

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

поступком намотавања или ламинирања, слика 5.5. Ламинирање је основни и најважнији процес израде делова од композитних материјала који се користе и за најоптерећеније и структурно најодговорније делове конструкције. Са развојем технологија напредовало се од поступка тзв. влажног ламинирања до „сувог поступка“ који користи препрег материјале, и готово је искључиви избор у изради савремених композитних конструкција. Под препрег (преимпрегнираним) материјалом се подразумева, неполимеризовани материјални систем армирајућих влакана и матрице у тканом или унидирекционалном (једносмерном) облику који задржава своје карактеристике на ниским или собним температурама одређено (дуже) време у сувом стању.



Слика 5.5. Распољивост технолошких процеса за изабране материјале

Препрег материјали који се користе у ваздухопловној индустрији су на бази модификоване епоксидне или фенолне смоле са унидирекционалним угљеничним или арамидним нитима или са платнима која су изаткана од стаклених, угљеничних или арамидних влакана. 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 арамидним влакнима. Постоје две основне расподеле упредених влакана у самом слоју. Слој може имати влакна оријентисана у истом правцу-унидирекциони слој (ламина) или могу бити

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

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.

Табела 5.7. Карактеристике удела карбонских влакана у ламинату: а) „тохо“ метод, б) „сацма“ метод

by Toho method											
Grade	Filament Count	Yield		Tensile Strength			Tensile Modulus			Density	
		tex	MPa	kgf/mm ²	ksi	GPa	tonf/inm ²	Msi	%		g/cm ³
Standard Modulus	HTA40	1 000	67	4100	420	590	240	24	35	1.7	1.77
		3 000	200								
		6 000	400								
		12 000	800								
	HTS40	3 000	200	4400	450	640	240	24	35	1.8	1.77
		6 000	400								
		12 000	800								
		24 000	1600								
	HTS45	12 000	800	4500	460	650	240	24	35	1.9	1.77
		24 000	1600								
	STS40	24 000	1600	4300	440	620	240	24	35	1.8	1.78
		48 000	3200								
UTS50	12 000	800	5100	520	740	245	25	36	2.1	1.78	
	24 000	1630									
Intermediate Modulus	IMS40	3 000	170	4500	460	650	290	30	42	1.6	1.73
		6 000	340								
		12 000	680								
		24 000	1360								
	IMS60	6 000	210	5800	590	840	290	30	42	2.0	1.79
		12 000	410								
		24 000	830								
		48 000	1630								
	IMS65	24 000	830	6000	610	870	290	30	42	2.1	1.78
		48 000	1630								
	HMA35	12 000	760	3300	340	480	355	36	51	0.9	1.78
		24 000	1520								
High Modulus	UMS40	12 000	390	4700	480	680	390	40	57	1.2	1.79
		24 000	780								
	UMS45	12 000	390	4600	470	670	425	43	62	1.1	1.83
		24 000	780								
UMS55	12 000	360	4000	410	580	550	56	80	0.7	1.91	
	24 000	720									
Metal-coated	HTS40 MC	12 000	1430	2900	300	420	230	23	33	1.3	2.70

by SACMA method											
Grade	Filament Count	Yield		Tensile Strength			Tensile Modulus			Density	
		tex	MPa	kgf/mm ²	ksi	GPa	tonf/inm ²	Msi	%		g/cm ³
Standard Modulus	HTA40	1 000	67	4100	420	590	230	23	33	1.8	1.77
		3 000	200								
		6 000	400								
		12 000	800								
	HTS40	3 000	200	4400	450	640	230	23	33	1.9	1.77
		6 000	400								
		12 000	800								
		24 000	1600								
	HTS45	12 000	800	4500	460	650	235	24	34	1.9	1.77
		24 000	1600								
	STS40	24 000	1600	4300	440	620	235	24	34	1.8	1.78
		48 000	3200								
UTS50	12 000	800	5100	520	740	235	24	34	2.2	1.78	
	24 000	1630									
Intermediate Modulus	IMS40	3 000	170	4500	460	650	280	29	41	1.6	1.73
		6 000	340								
		12 000	680								
		24 000	1360								
	IMS60	6 000	210	5800	590	840	280	29	41	2.1	1.79
		12 000	410								
		24 000	830								
		48 000	1630								
	IMS65	24 000	830	6000	610	870	280	29	41	2.1	1.78
		48 000	1630								
	HMA35	12 000	760	3300	340	480	340*	35*	49*	1.0*	1.78
		24 000	1520								
High Modulus	UMS40	12 000	390	4700	480	680	375*	38*	54*	1.3*	1.79
		24 000	780								
	UMS45	12 000	390	4600	470	670	415	42	60	1.1	1.83
		24 000	780								
UMS55	12 000	360	4000	410	580	540	55	78	0.7	1.91	
	24 000	720									
Metal-coated	HTS40 MC	12 000	1430	2900	300	420	225*	23*	33*	1.3*	2.70

Табела 5.8. Подаци о уделу влакана и смоле у израђеном ламинату

Material data of our SIGRAPREG® unidirectional and multiaxial fabric preregs					
Material type	Construction	Areal weight (dry) [g/m ²]	Width [cm]	Resin type	Resin mass content [%]
Unidirectional					
C U200-0/NF-E310/30%	unidirectional	200	63.5	epoxy	30
C U255-0/NF-E322/37%	unidirectional	255	60	epoxy	37
C U300-0/NF-E420/38%	unidirectional	300	30	snap-cure epoxy	38
Unidirectional (fixed)					
C U100-0/SO-E501/40%	unidirectional	100	60	epoxy	40
C U150-0/SO-P310/38%	unidirectional	150	60	phenolic	38
C U450-0/SD-E501/36%	unidirectional	450	63.5	epoxy	36
C U600-0/SD-E501/33%	unidirectional	600	125	epoxy	33
Multiaxial					
C B160-45/SO-E501/47%	biaxial	160	60	epoxy	47
C B450-45/SO-E501/38%	biaxial	450	73.5	epoxy	38
C B300-45/ST-E331/42%	biaxial	300	126	epoxy	42
C B610-45/ST-E320/40%	biaxial	610	126	epoxy	40

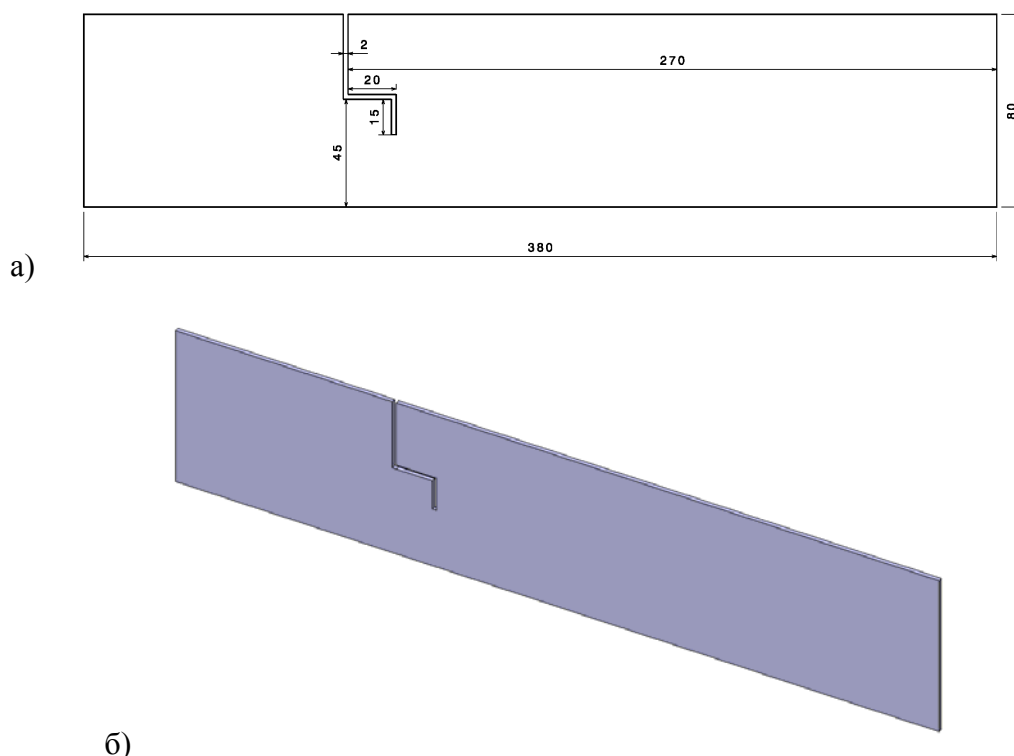
У овом експерименту, испитане плоче су ламинати карбон-епоксидног састава, при чему је 8 слојева различито оријентисано (слагање ламина под

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

различитим угловима) за сваки од 6 типова плоча. Ламинат је унидирекционо платно, карбон ознаке CU 300-0/SO, са 300 g/m^2 платна, уделом влакана ознаке HTS40-12k 800tex, дебљине 0.3 mm по слоју и епоксидном смолом „Hexion Speciality Chemicals Stuttgart“ ознаке L285 са учвршћивачем H287. У табелама 5.7 и 5.8 су приказане карактеристике удела карбонских влакана дате од стране произвођача карбонских влакана и ламината [www.teijincarbon.com], [www.sglgroup.com].

5.3 Експериментално испитивање композитних плоча

Експеримент је обухватао четири сегмента испитивања; први се односио на здраве, а остали на оштећене плоче. За тестирање је припремљено 6 композитних плоча, карбон-епоксидног састава, при чему су све плоче биле истих димензија али различите оријентације слојева.



а)
б)
Слика 5.6. Димензије оштећене плоче; а) скица димензија оштећења,
б) изогетријски модел

Све испитиване плоче су димензија $(380 \times 80 \times 2)$ mm, са 8 слојева ламината, различито оријентисаних за сваки тип плоче. Након испитивања здравих

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

структура, урађено је испитивање оштећених, при чему су плоче (слика 5.6) оштећене у виду: 1) хоризонталног зареза димензија (35×2) mm на удаљености 270 mm од слободног краја плоче, 2) зареза димензија (20×2) mm који се наставља управно на претходни и 3) хоризонталног зареза димензија (15×2) mm.

Платна свих ламината су унидирекциона, само је ређање слојева у процесу производње одговарајућих плоча оријентисано под различитим угловима постављања.

- ➔ **Плоча 1** – Унидирекционални ламинат 0°
- ➔ **Плоча 2** – Симетрични квази-изотропски ламинат са редоследом слагања: $(90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ/-45^\circ/+45^\circ/90^\circ)$
- ➔ **Плоча 3** – Уравнотежени ламинат са редоследом слагања: $(90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ)$
- ➔ **Плоча 4** – Симетрични ламинат са редоследом слагања: $(0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)$
- ➔ **Плоча 5** – Симетрични ламинат са редоследом слагања: $(+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ)$
- ➔ **Плоча 6** – Анти-симетрични ламинат са редоследом слагања: $(+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/-45^\circ)$

На слици 5.7 су приказане плоче пре и после наношења одговарајућег патерна и припремљене за испитивање.



а) Плоча 1



б) Плоча 2



в) Плоча 3

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења



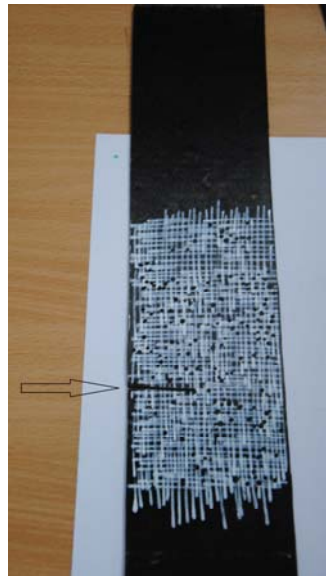
г) Плоча 4

д) Плоча 5

ђ) Плоча 6

Слика 5.7. Композитне плоче пре и након nanoшења патерна

Након оштећења структура, спроведена је идентична мерна процедура као и код плоча и иницијалном стању. На слици 5.8 је приказана једна оштећена плоча, при чему су и остале плоче на исти начин оштећене и припремљене за испитивање.

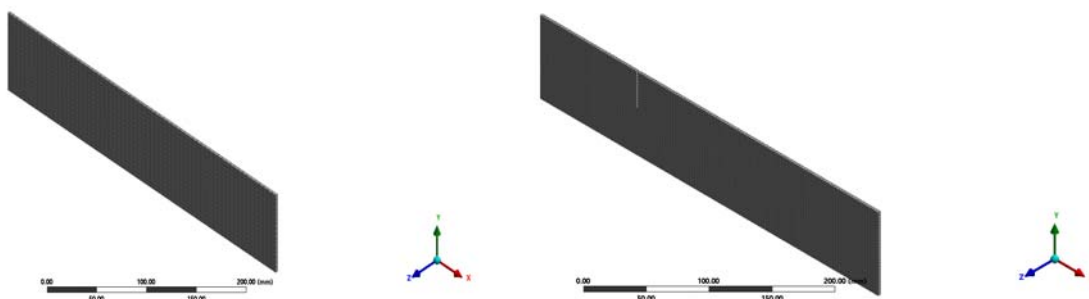


Слика 5.8. Приказ плоче са локацијом оштећења у виду зареза (35×2) mm на удаљености 270 mm од слободног краја плоче

Поступак мерења DIC методом је изведен по процедури која је детаљно описана у претходном поглављу при испитивању алуминијумске плоче. Након хардверског подешавања, урађена је калибрација и започет сет снимања и извођења експеримента на свим плочама. Интервал снимања је у просеку за сваки експеримент износио око $T = 1.2$ s, учестаношћу од 3000 fps. Снимање је такође изведено као и при испитивању алуминијумске плоче где је применом механичког удара изазвано осциловање структуре. Такође, тачка побуде је варирана током извођења сваког од експеримента, док није пронађена позиција давања најбољег одзива.

5.4 Нумеричка симулација

Нумеричка симулација је такође изведена као и у претходном поглављу, методом коначних елемената. При дефинисању геометрије, изабран је одговарајући ламинат и за сваку плочу дефинисан распоред слагања слојева као и код реалне структуре. Облик плоче је замењен генерисаном мрежом плочастих елемената (слика 5.9), где број коначних елемената износи мало више од хиљаду (око 1200).



Слика 5.9. Приказ мреже коначних елемената симулиране плоче пре и након оштећења

Да би се обезбедила независност резултата од густине (финоће) прорачунске мреже изведене су студије конвергенције мреже за оба модела, и здраве и оштећене плоче. Како је у питању правилна геометрија, све мреже су униформне, и дефинисане величином странице појединачног елемента квадратног облика (изражено у [mm]). Конвергенције прве 4 сопствене фреквенције приказане су у табелама 5.9 и 5.10 за неоштећене и оштећене плоче.

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

Табела 5.9. Студија конвергенције мреже за здраву плочу

Дужина ивице елемента [mm]	Број елемената	v_1 [Hz]	v_2 [Hz]	v_3 [Hz]	v_4 [Hz]
10	304	24.216	83.805	151.75	282.84
5	1216	24.214	83.643	151.55	282.02
3	3429	24.213	83.509	151.51	281.56
2	7520	24.213	83.421	151.49	281.29

Табела 5.10. Студија конвергенције мреже за оштећену плочу

Дужина ивице елемента [mm]	Број елемената	v_1 [Hz]	v_2 [Hz]	v_3 [Hz]	v_4 [Hz]
10	304	9.765	61.151	129.79	171.86
5	1216	9.761	61.051	129.09	171.16
3	3429	9.760	61.026	128.72	170.99
2	7520	9.759	61.017	128.56	170.94

5.5 Дискусија резултата

Испитано је свих 6 плоча пре и након оштећења. Добијене вредности сопствених фреквенција су упоређене са нумеричким и извршена је анализа резултата и утицаја оштећења на промену у облицима осциловања.

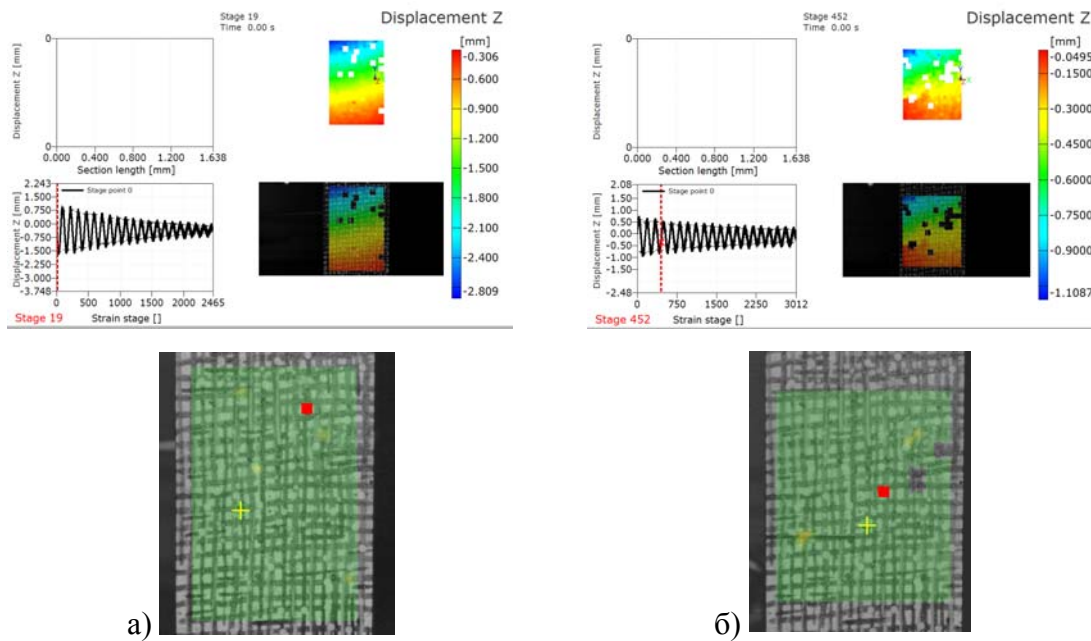
5.5.1 Експеримент

На свакој од плоча експеримент је понављан више пута, све док није било могуће утврдити најбољу позицију побуде у циљу добијања што бољег сигнала. Такође, сам поступак снимања плоча током деловања динамичког оптерећења, је био у директној зависности од нивоа и јачине осветљења, тако да је било потребно ускладити и подесити довољан интензитет осветљености у веома кратком временском интервалу због велике брзине снимања (3000 fps).

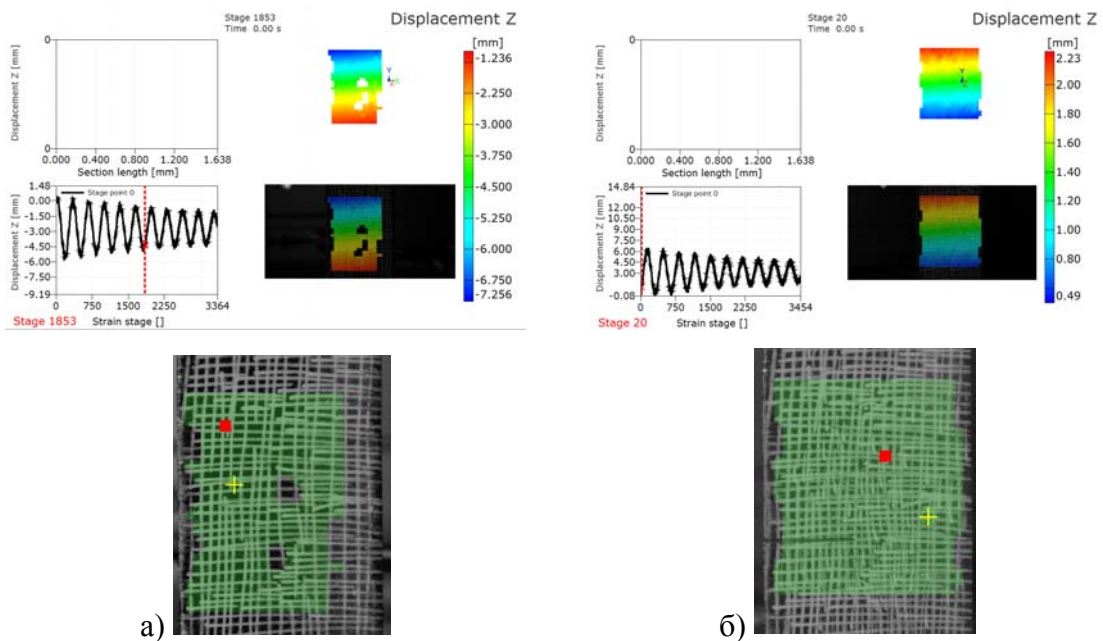
На сликама 5.10-15 илустрована је обрада снимљених слика у ARAMIS софтверу за свих 6 плоча пре и након оштећења. Резултујуће померање у z-правцу је представљено на изабраном делу плоче (обојеном зеленом бојом) који је

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

анализиран током прорачуна. Изабрана је произвољна тачка чије су координате и померања у једном временском тренутку приказане на графику. Скала померања у z-правцу приказана је на десној страни слике, где плава боја одговара најмањим а црвена највишим измереним вредностима. Доњи графици приказују добијене дијаграме одзива у временском домену.

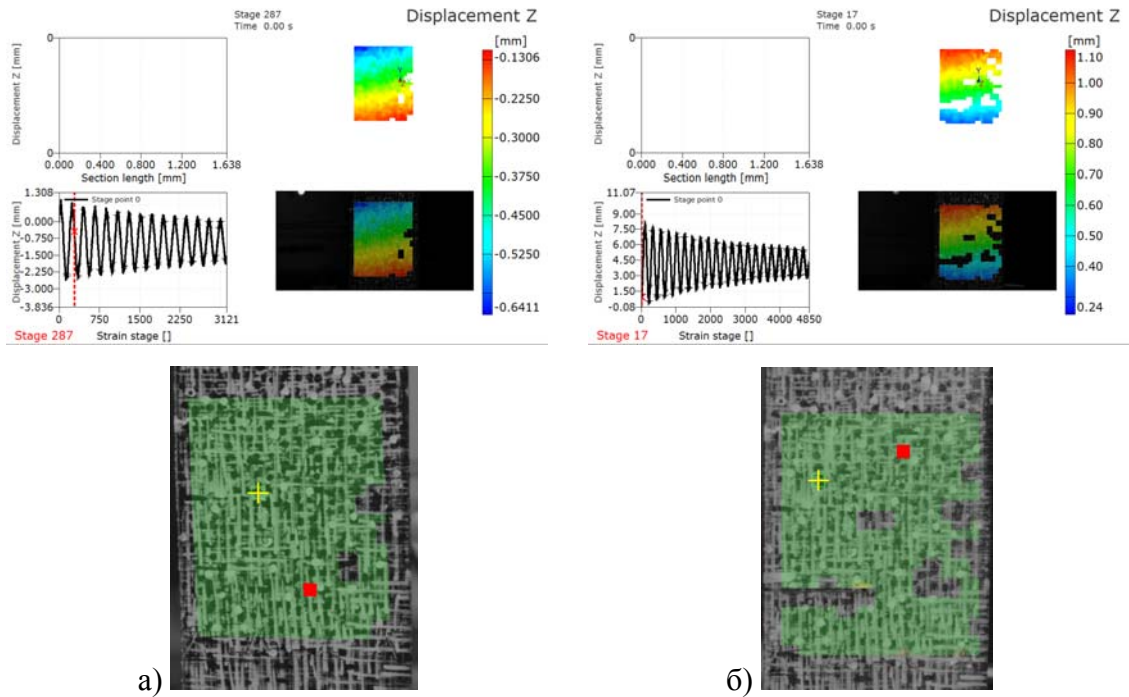


Слика 5.10. Анализа у ARAMIS софтверу плоче 1; а) здрава; и б) оштећена плоча

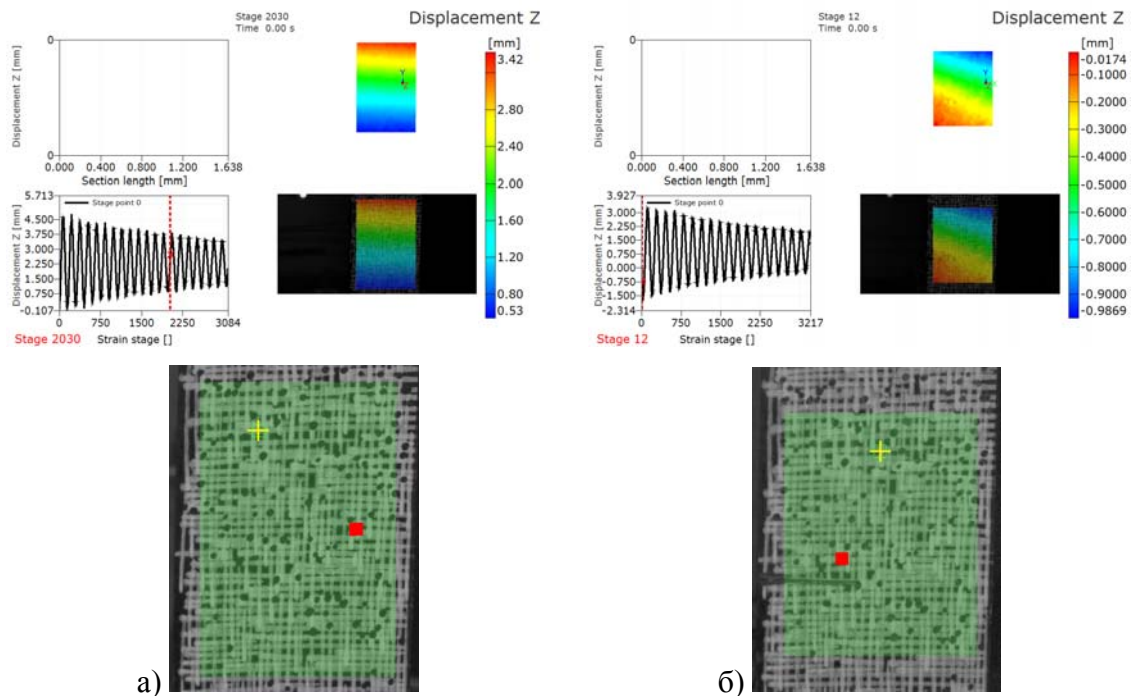


Слика 5.11. Анализа у ARAMIS софтверу плоче 2; а) здрава; и б) оштећена плоча

Глава 5: Экспериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

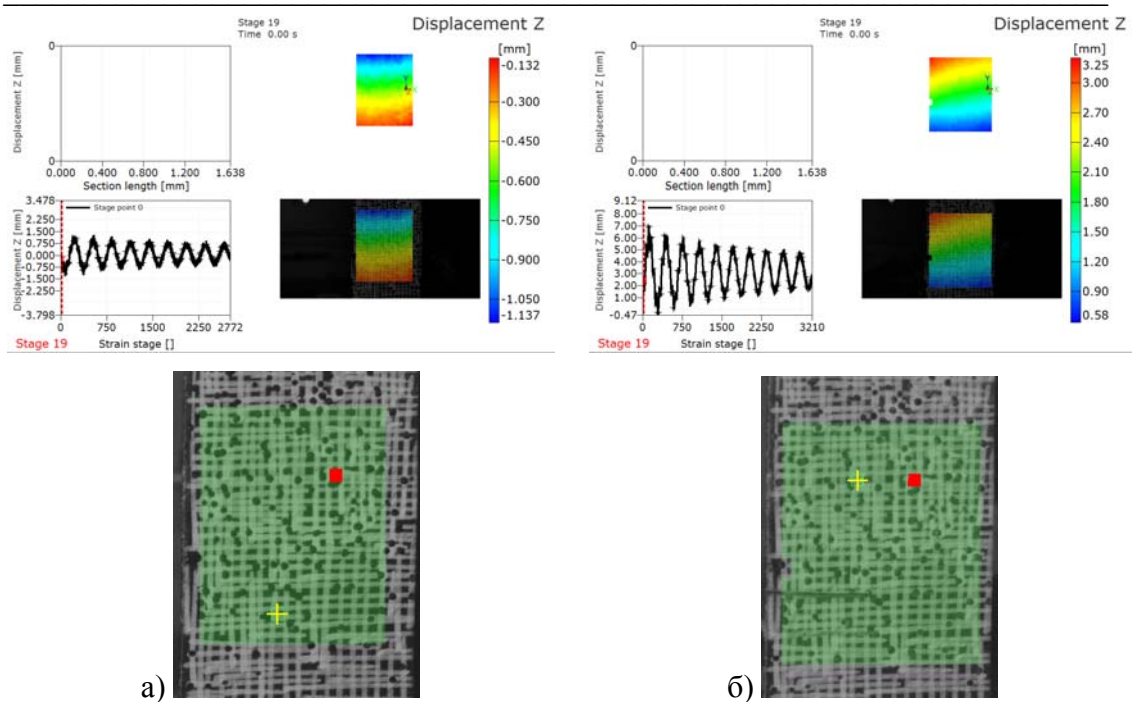


Слика 5.12. Анализа у ARAMIS софтверу плоче 3; а) здрава; и б) оштећена плоча

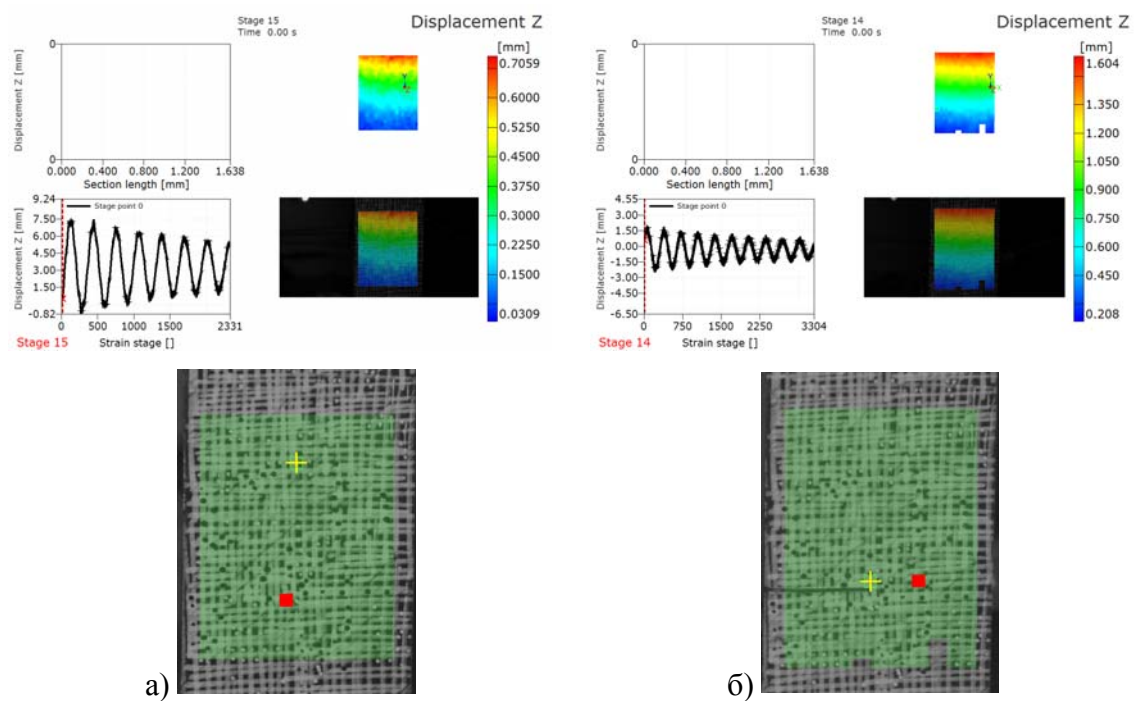


Слика 5.13. Анализа у ARAMIS софтверу плоче 4; а) здрава; и б) оштећена плоча

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења



Слика 5.14. Анализа у ARAMIS софтверу плоче 5; а) здрава; и б) оштећена плоча

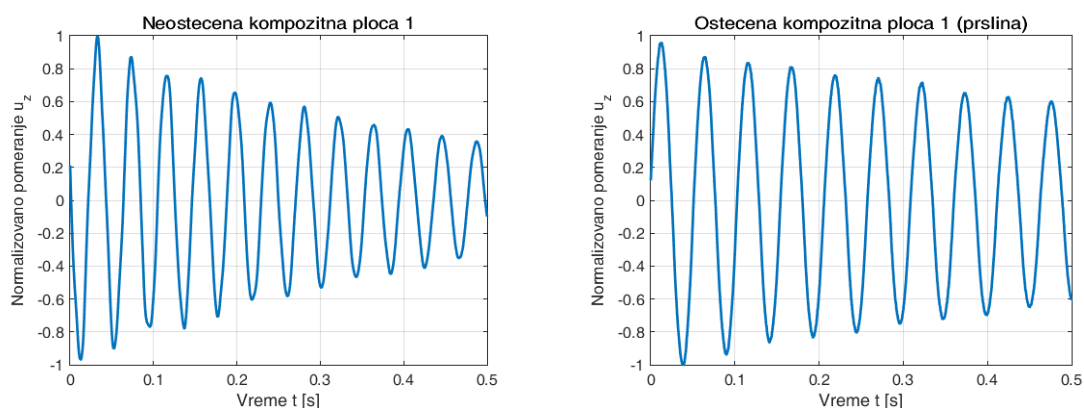


Слика 5.15. Анализа у ARAMIS софтверу плоче 6; а) здрава; и б) оштећена плоча

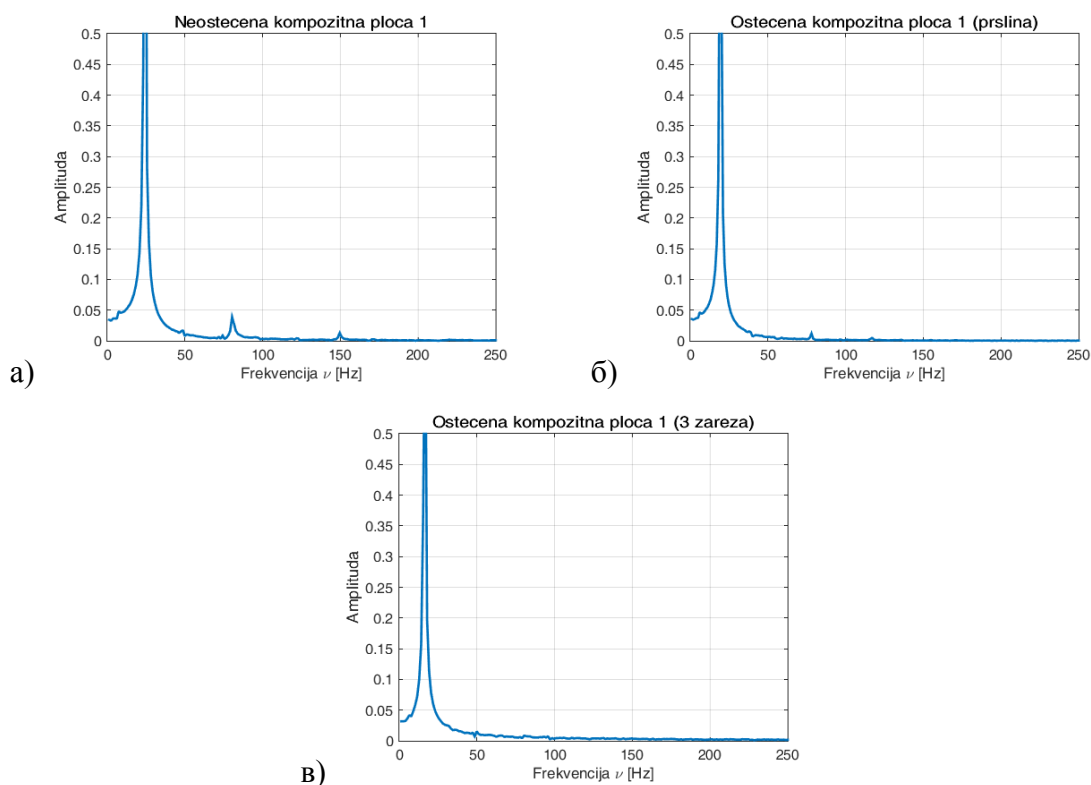
Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

Добијена померања у временском домену, пример на слици 5.16, су потом додатно обрађена и Фуријеовом трансформацијом преведена у фреквентни домен (слика 5.17), односно израчунате су вредности сопствених фреквенција структура.

Плоча 1 – Унидирекциони тип (0°)



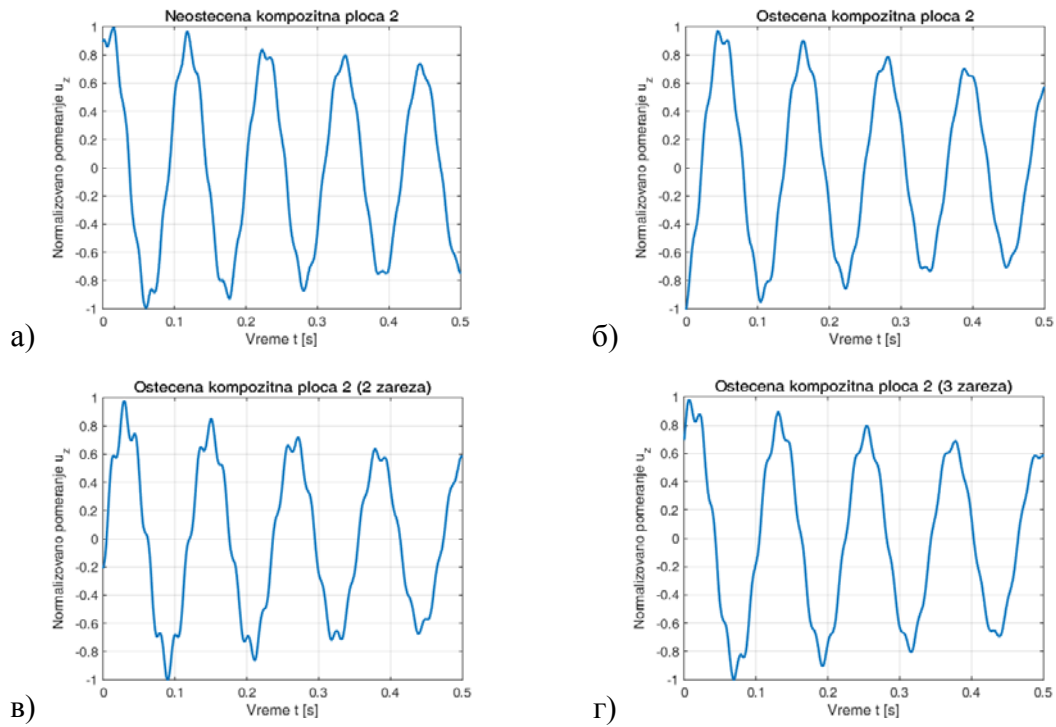
Слика 5.16. Одзив плоче 1 у временском домену; а) здрава, б) оштећена



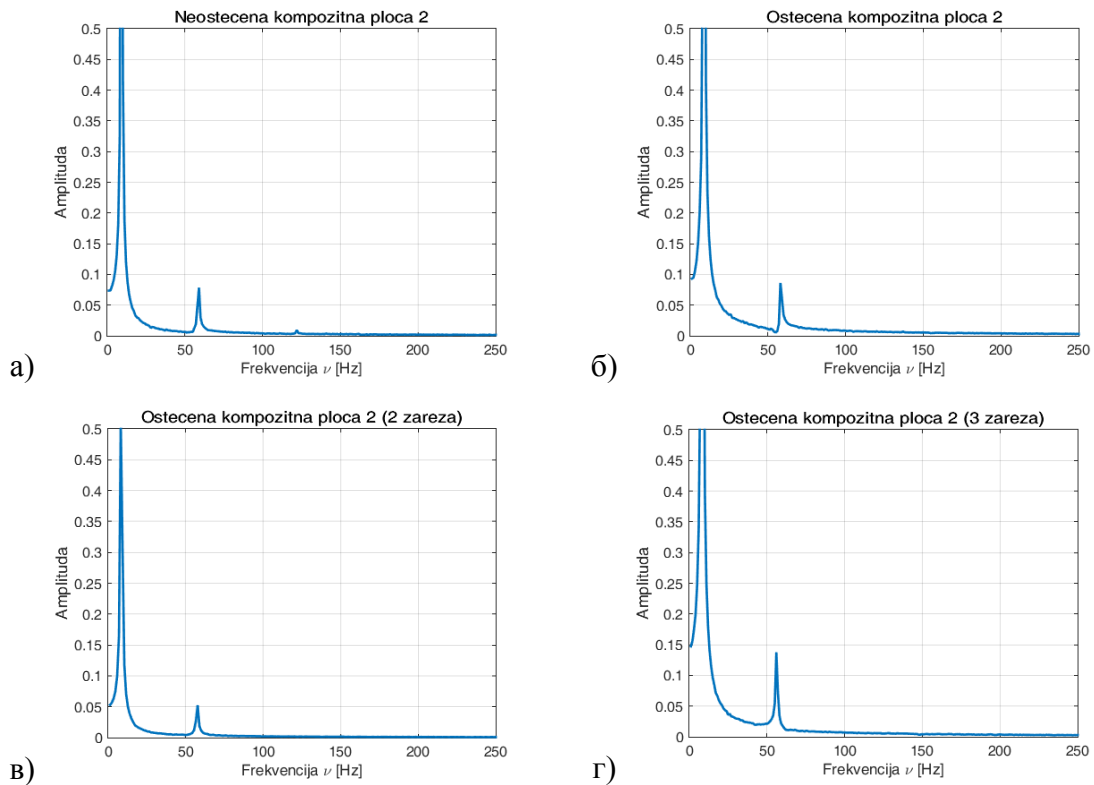
Слика 5.17. Одзив плоче 1 у фреквентном домену; а) здрава, б-в) оштећена

Глава 5: Экспериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

Плоча 2 – Симетрични квази-изотропски тип: $(90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ/-45^\circ/+45^\circ/90^\circ)$



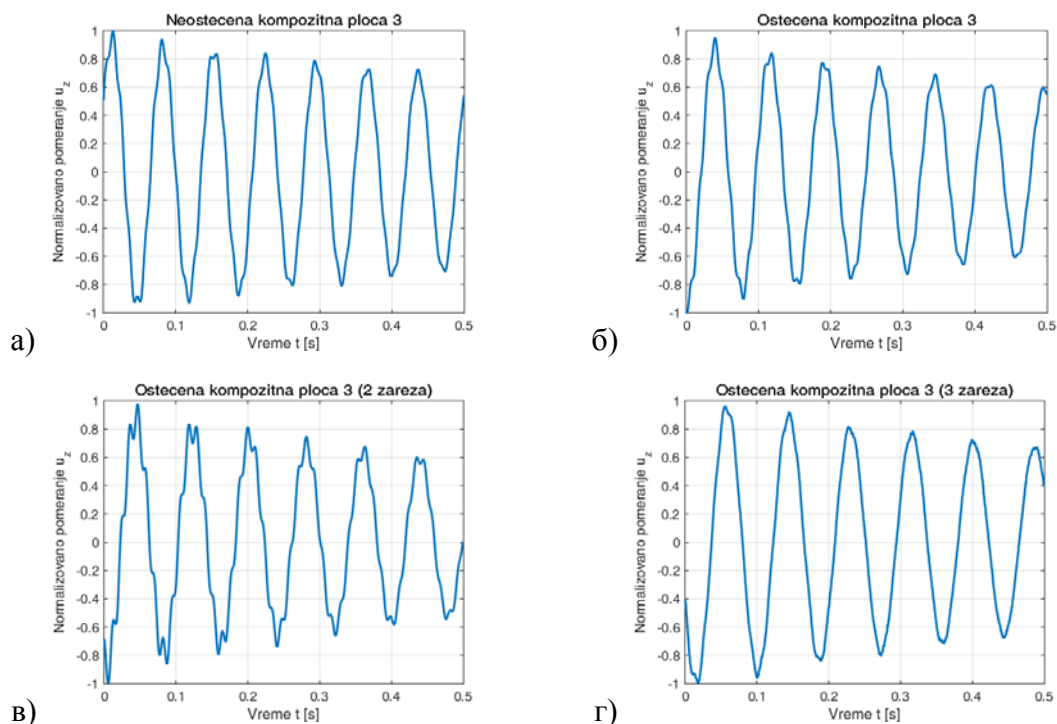
Слика 5.18. Одзив плоче 2 у временском домену; а) здрава, б-г) оштећене



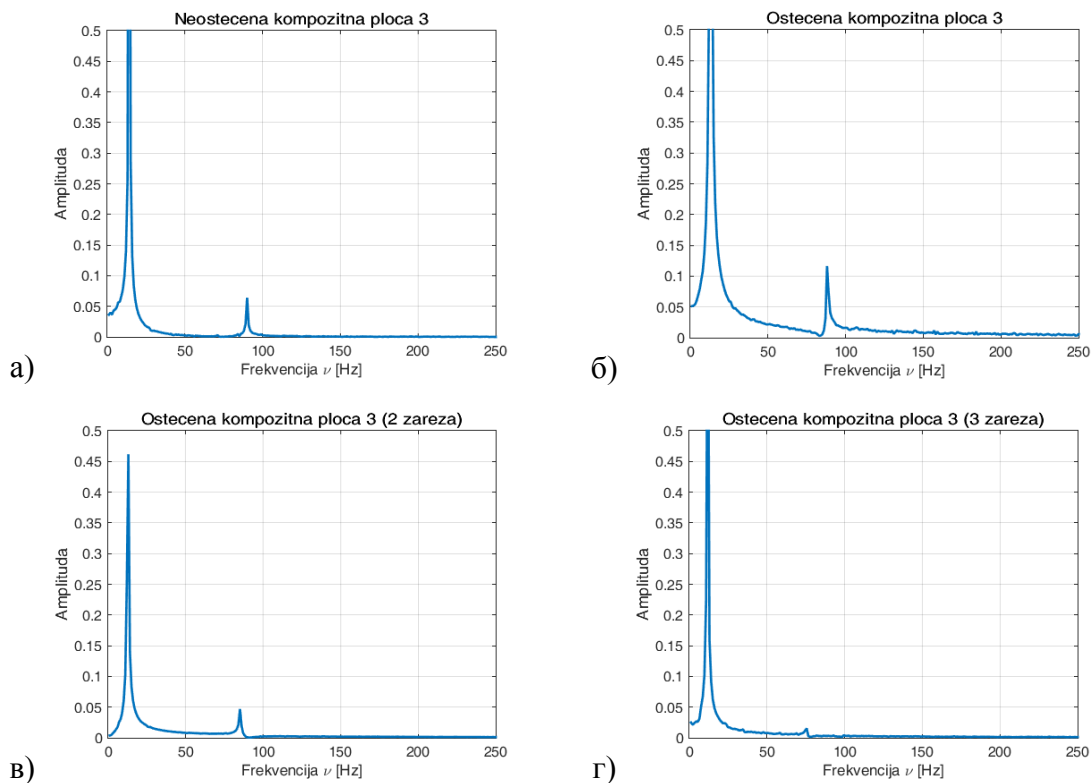
Слика 5.19. Одзив плоче 2 у фреквентном домену; а) здрава, б-г) оштећене

Глава 5: Экспериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

Плоча 3 – Уравнотежени тип ($90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ$)



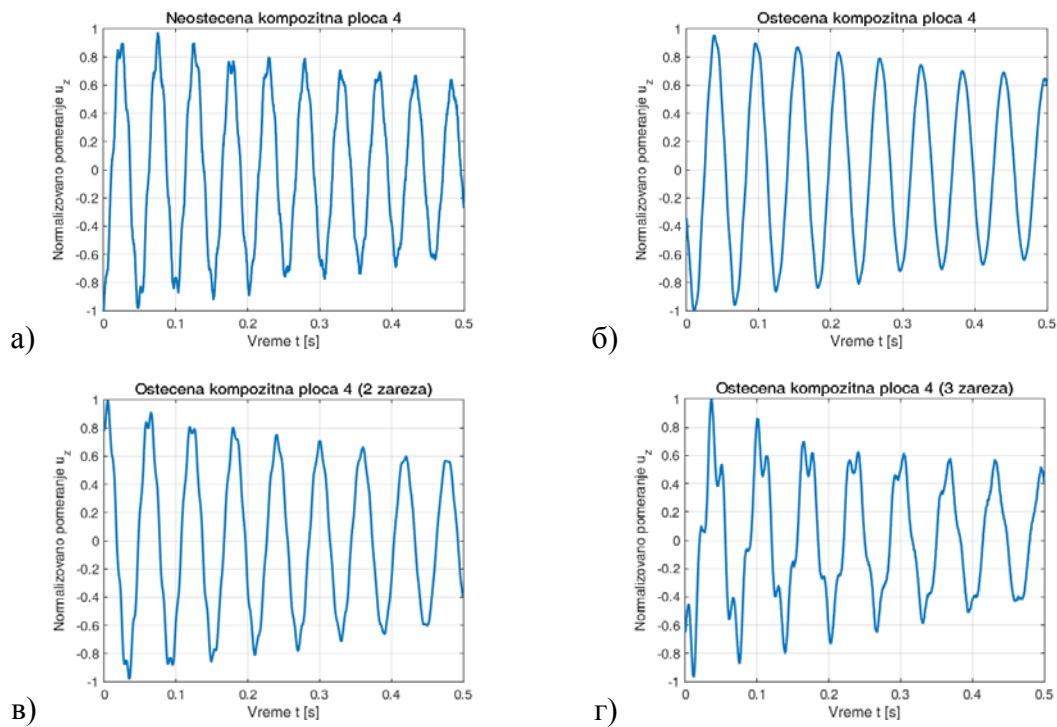
Слика 5.20. Одзив плоче 3 у временском домену; а) здрава, б-г) оштећене



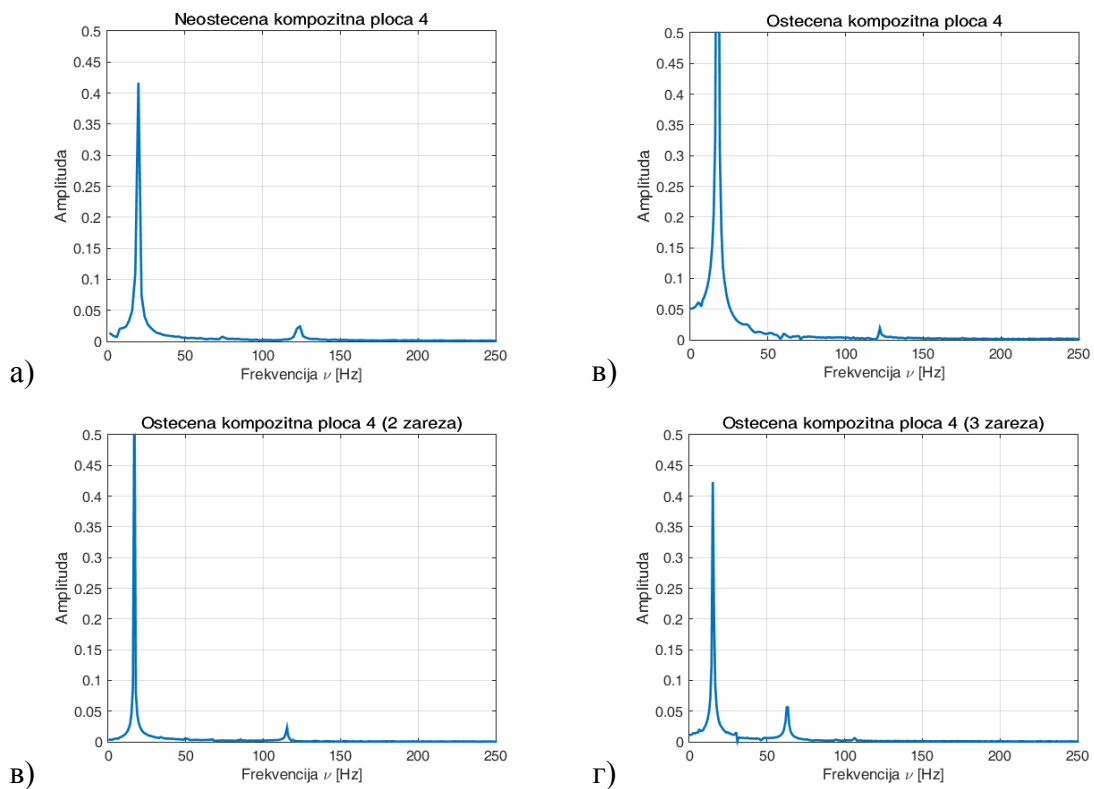
Слика 5.21. Одзив плоче 3 у фреквентном домену; а) здрава, б-г) оштећене

Глава 5: Экспериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

Плоча 4 – Симетрични тип ($0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$)



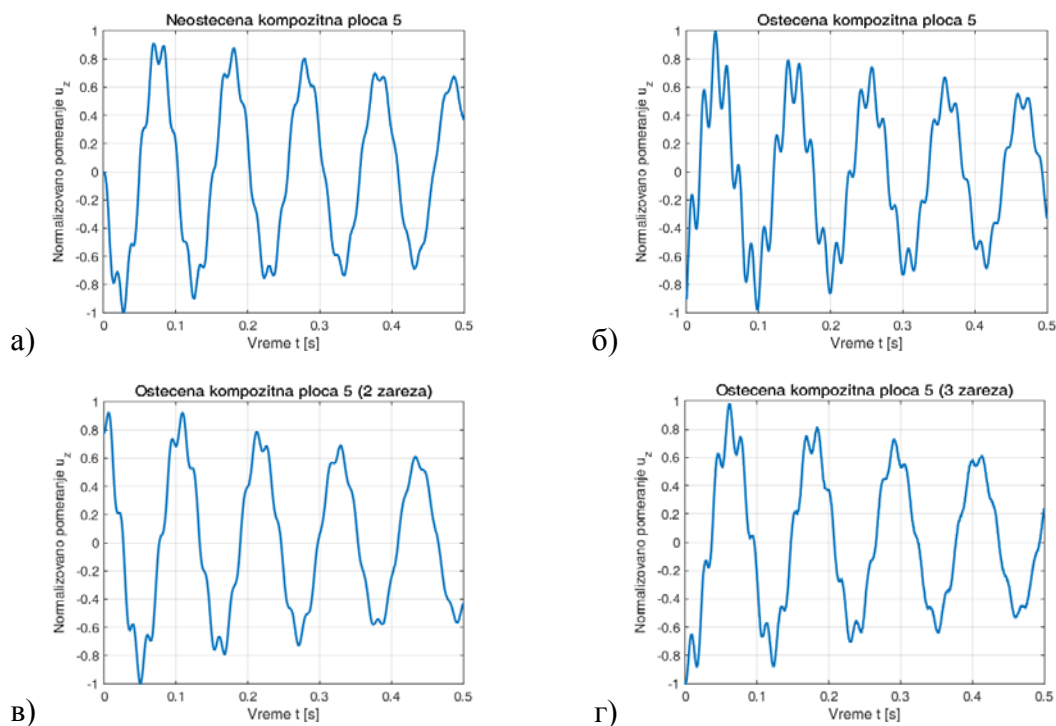
Слика 5.22. Одзив плоче 4 у временском домену; а) здрава, б-г) оштећене



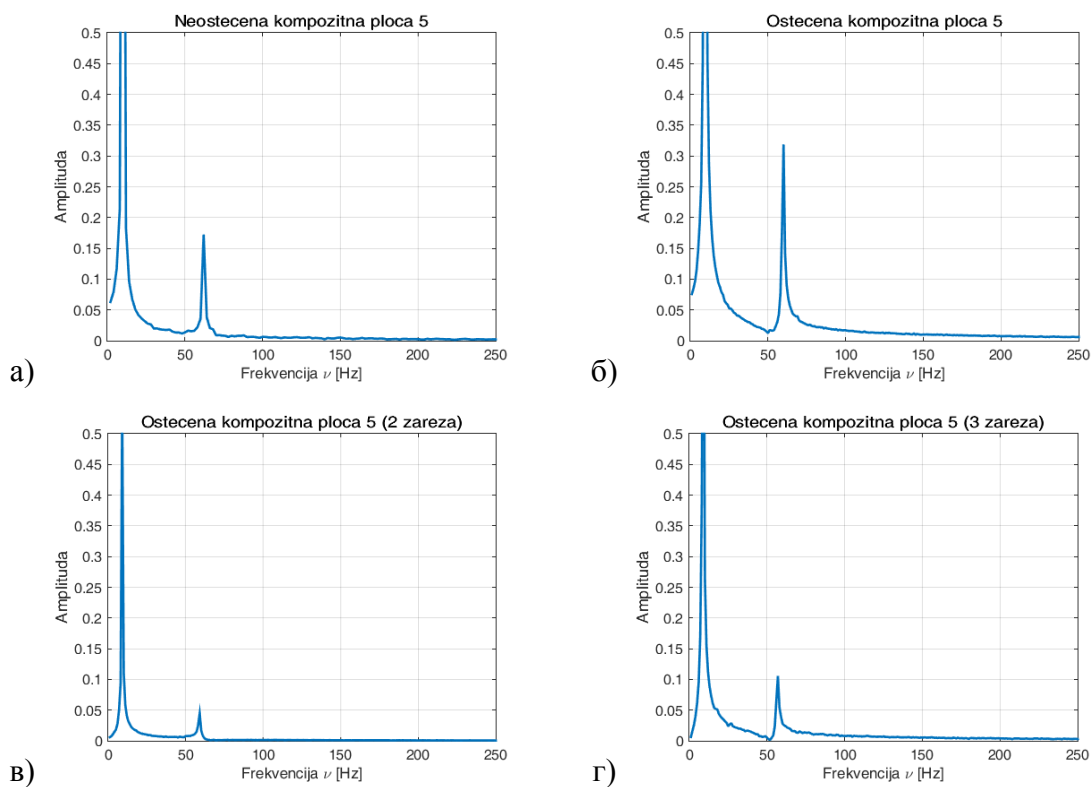
Слика 5.23. Одзив плоче 4 у фреквентном домену; а) здрава, б-г) оштећене

Глава 5: Экспериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

Плоча 5 – Симетрични тип (+45°/-45°/+45°/-45°/-45°/+45°/-45°/+45°)



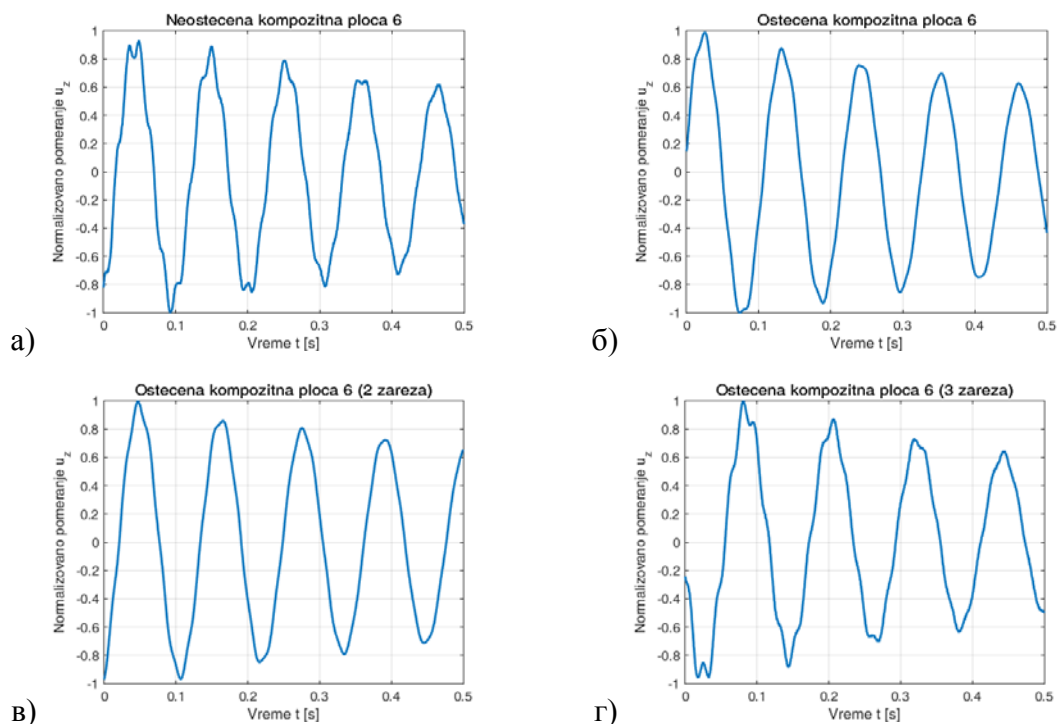
Слика 5.24. Одзив плоче 5 у временском домену; а) здрава, б-г) оштећене



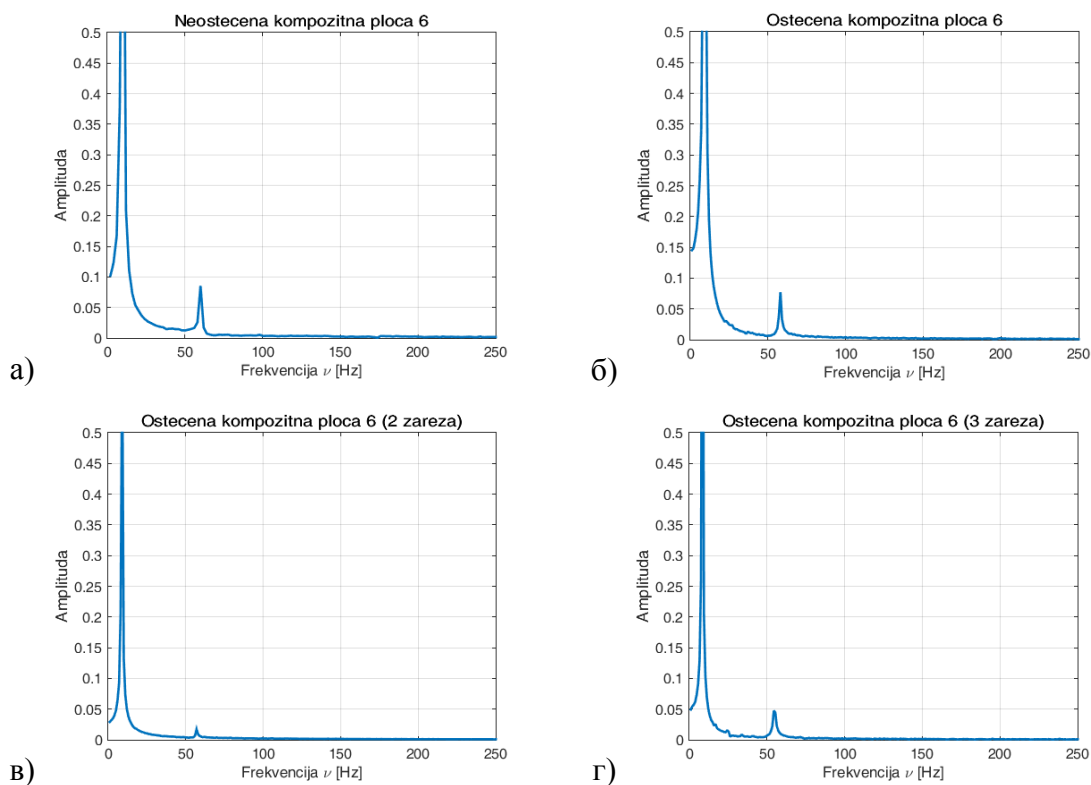
Слика 5.25. Одзив плоче 5 у фреквентном домену; а) здрава, б-г) оштећене

Глава 5: Экспериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

Плоча 6 – Анти-симетрични тип (+45°/-45°/+45°/-45°/+45°/-45°/+45°/-45°)



Слика 5.26. Одзив плоче 6 у временском домену; а) здрава, б-г) оштећене



Слика 5.27. Одзив плоче 6 у фреквентном домену; а) здрава, б-г) оштећене

5.5.2 Нумеричка симулација

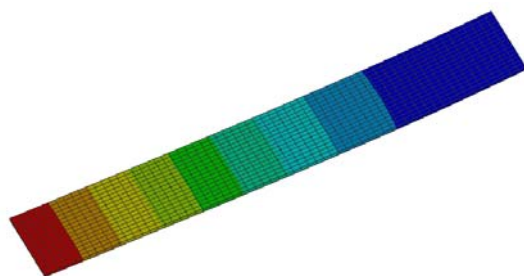
Механичке карактеристике материјала коришћеног у прорачуну – ламине Ероху Carbon UD (230 GPa) Prepreg приказане су у табели 5.9.

Табела 5.9. Подаци о уделу влакана и смоле у израђеном ламинату

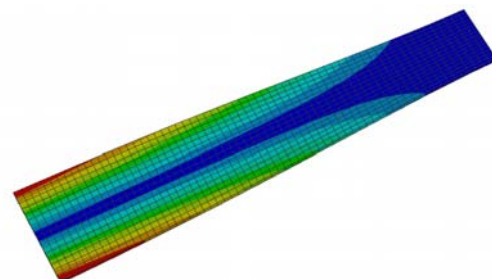
Величина	Јединица	Вредност
Густина ρ	[g/cm ³]	1.49
Модул еластичности E_x	[GPa]	121
Модул еластичности E_y	[GPa]	8.6
Модул еластичности E_z	[GPa]	8.6
Поасонов коефицијент ν_{xy}		0.27
Поасонов коефицијент ν_{yz}		0.4
Поасонов коефицијент ν_{zx}		0.27
Модул клизања G_{xy}	[MPa]	4.7
Модул клизања G_{yz}	[MPa]	3.1
Модул клизања G_{zx}	[MPa]	4.7

На сликама 5.28-39 приказано је првих шест модова добијених прорачуном у оквиру модула модалне анализе.

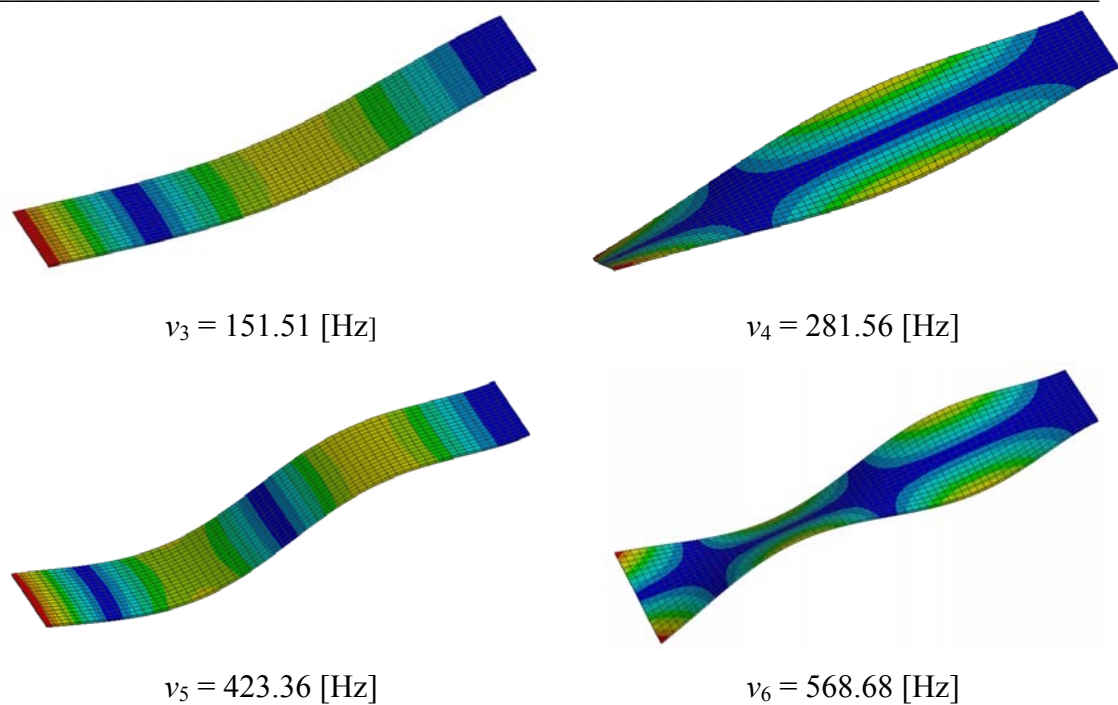
Плоча 1 – Унидирекциони тип (0°)



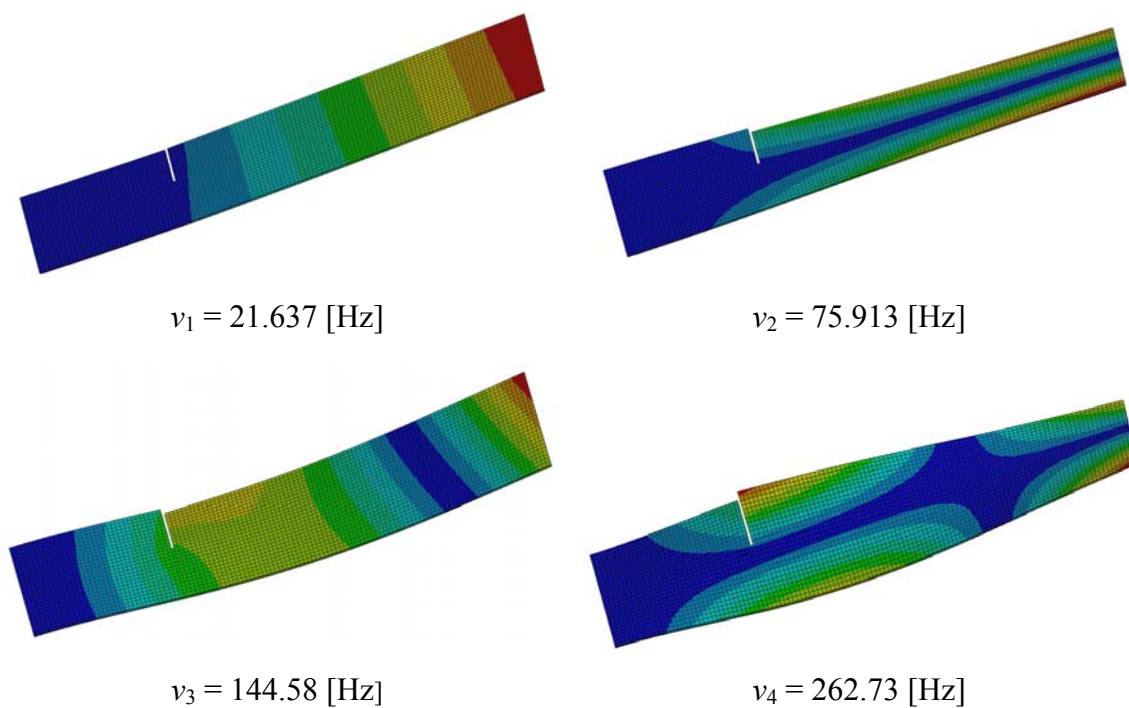
$$\nu_1 = 24.213 \text{ [Hz]}$$

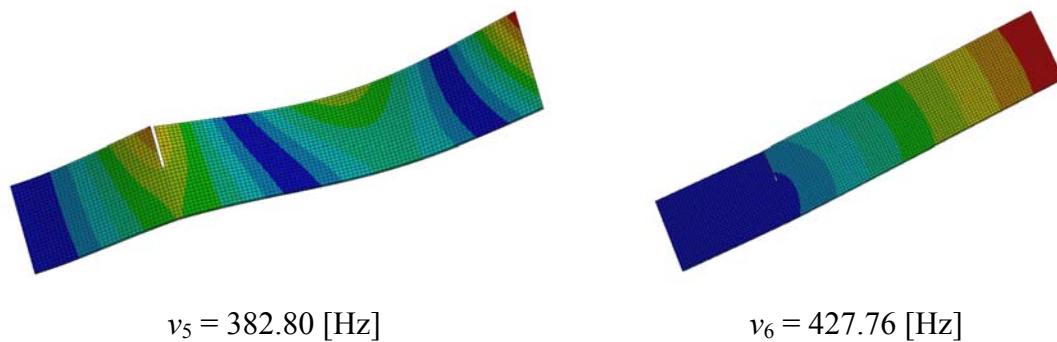


$$\nu_2 = 83.509 \text{ [Hz]}$$



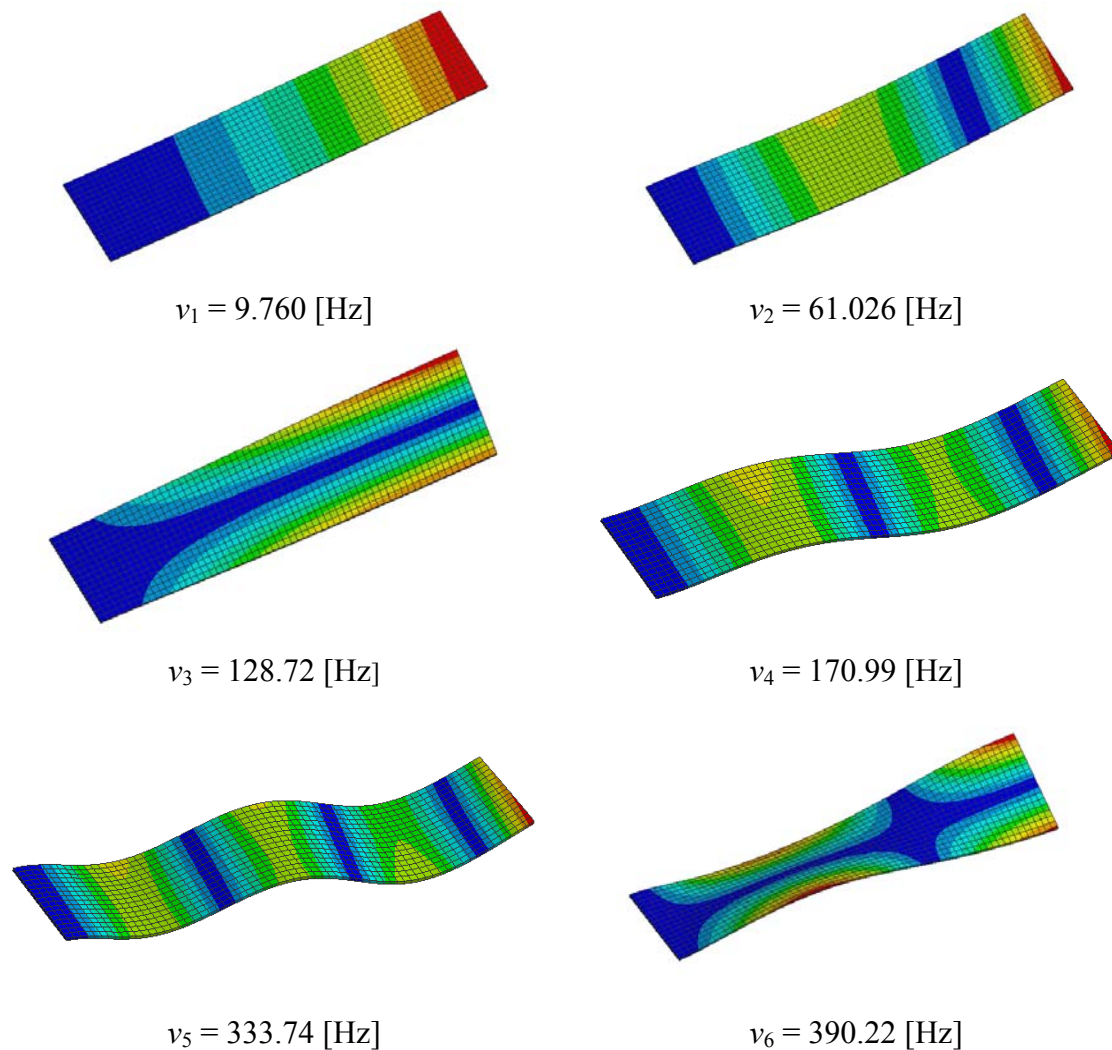
Слика 5.28. Добијени облици осциловања здраве плоче 1; модови савијања су 1, 3, и 5; а увијања су 2, 4. и 6.



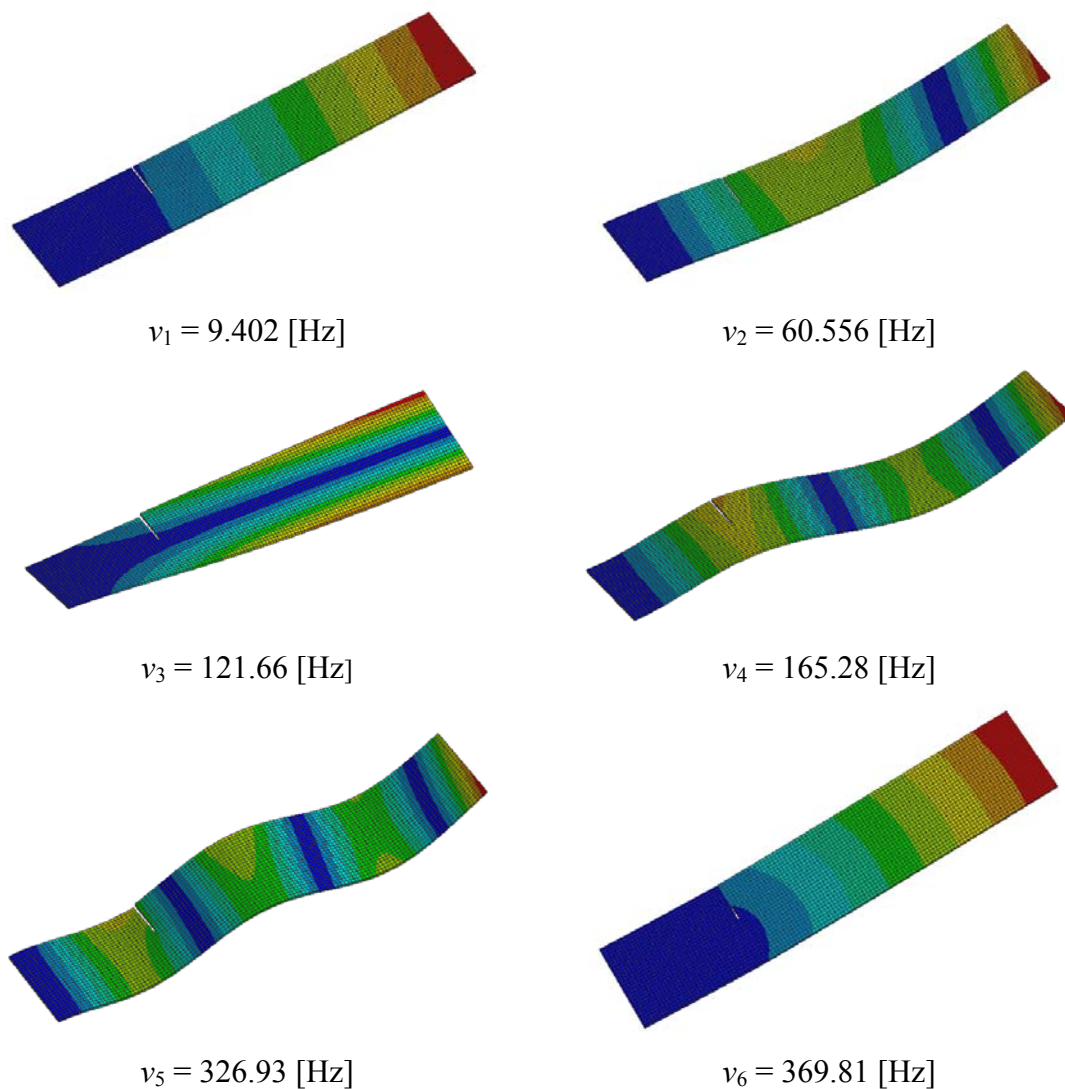


Слика 5.29. Добијени облици осциловања оштећене плоче 1; модови савијања су 1, 3. и 5; увијања су 2. и 4; 6. мод одговара савијању у равни плоче

Плоча 2 – Симетрични квази-изотропски тип: $(90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ/-45^\circ/+45^\circ/90^\circ)$

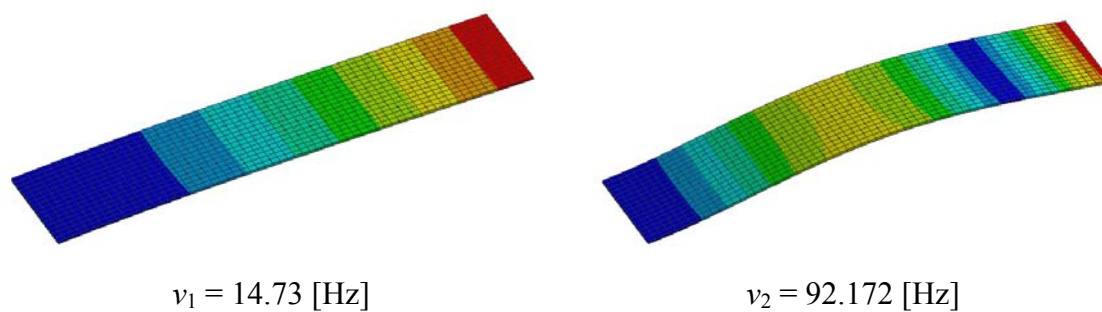


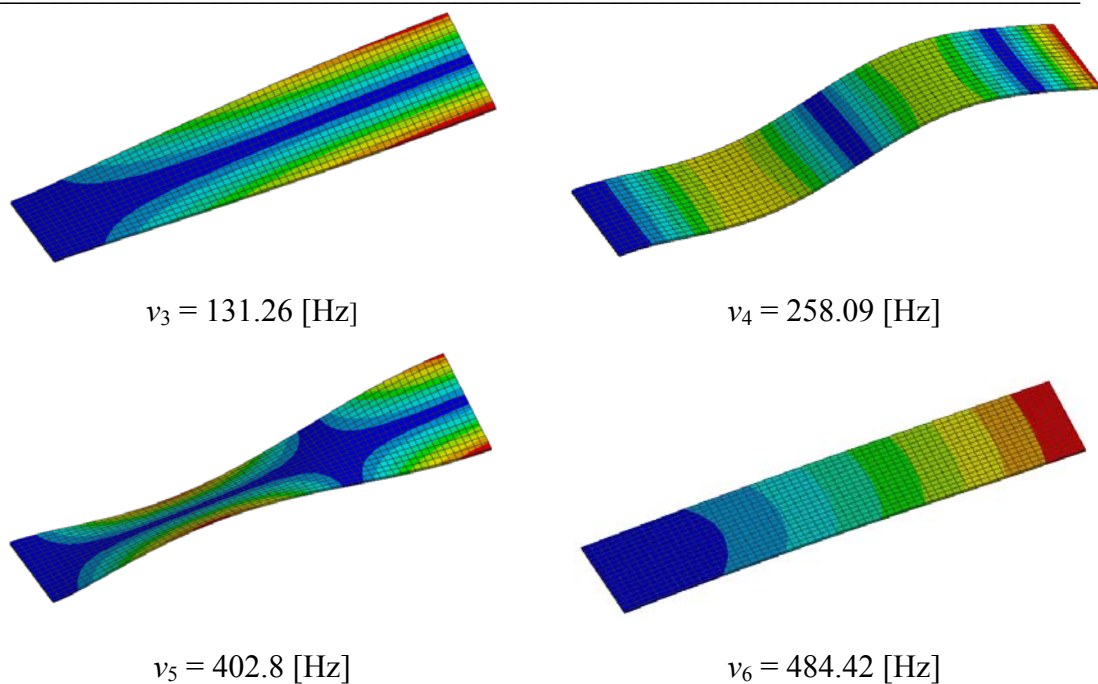
Слика 5.30. Добијени облици осциловања здраве плоче 2; модови савијања су 1, 2, 4. и 5; а увијања су 3. и 6.



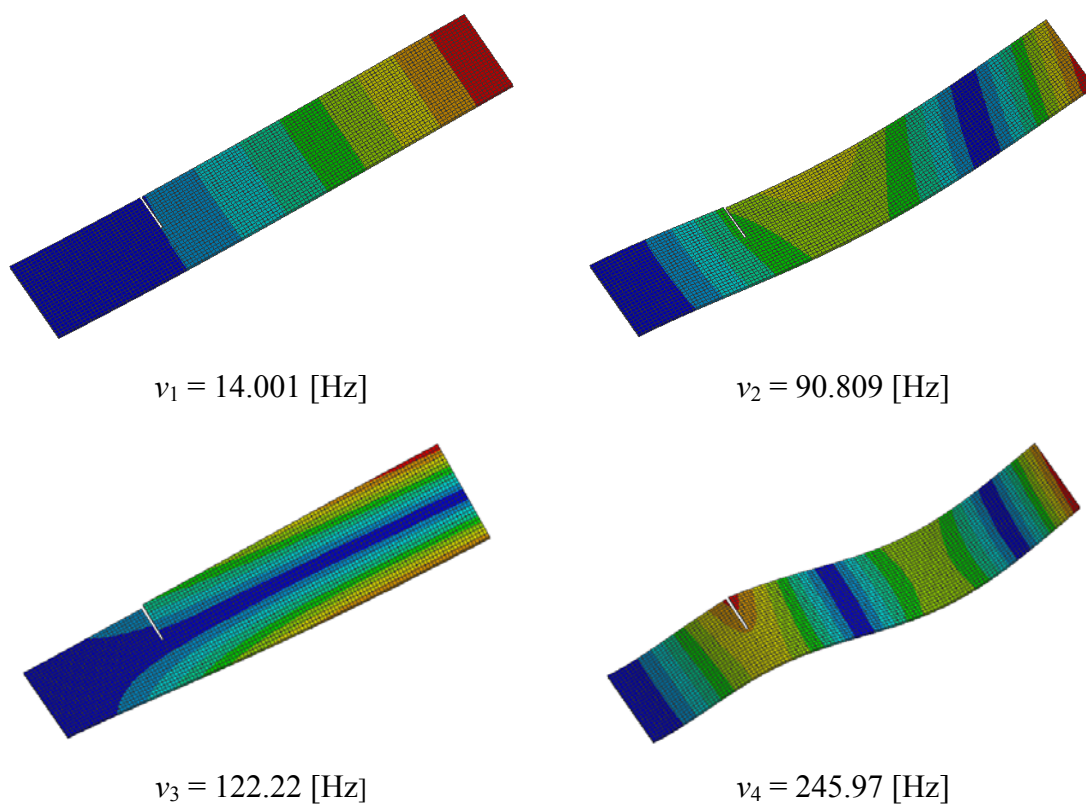
Слика 5.31. Добијени облици осциловања оштећене плоче 2; модови савијања су 1, 2, 4. и 5; увијања је 3; 6. мод одговара савијању у равни плоче

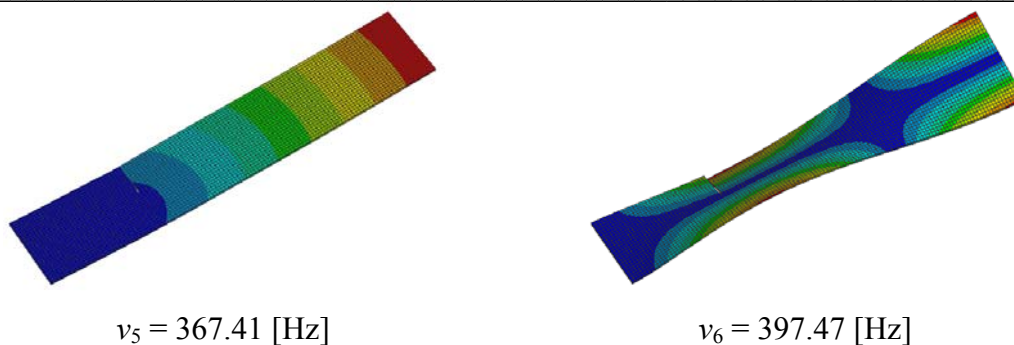
Плоча 3 – Уравнотежени тип ($90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ$)





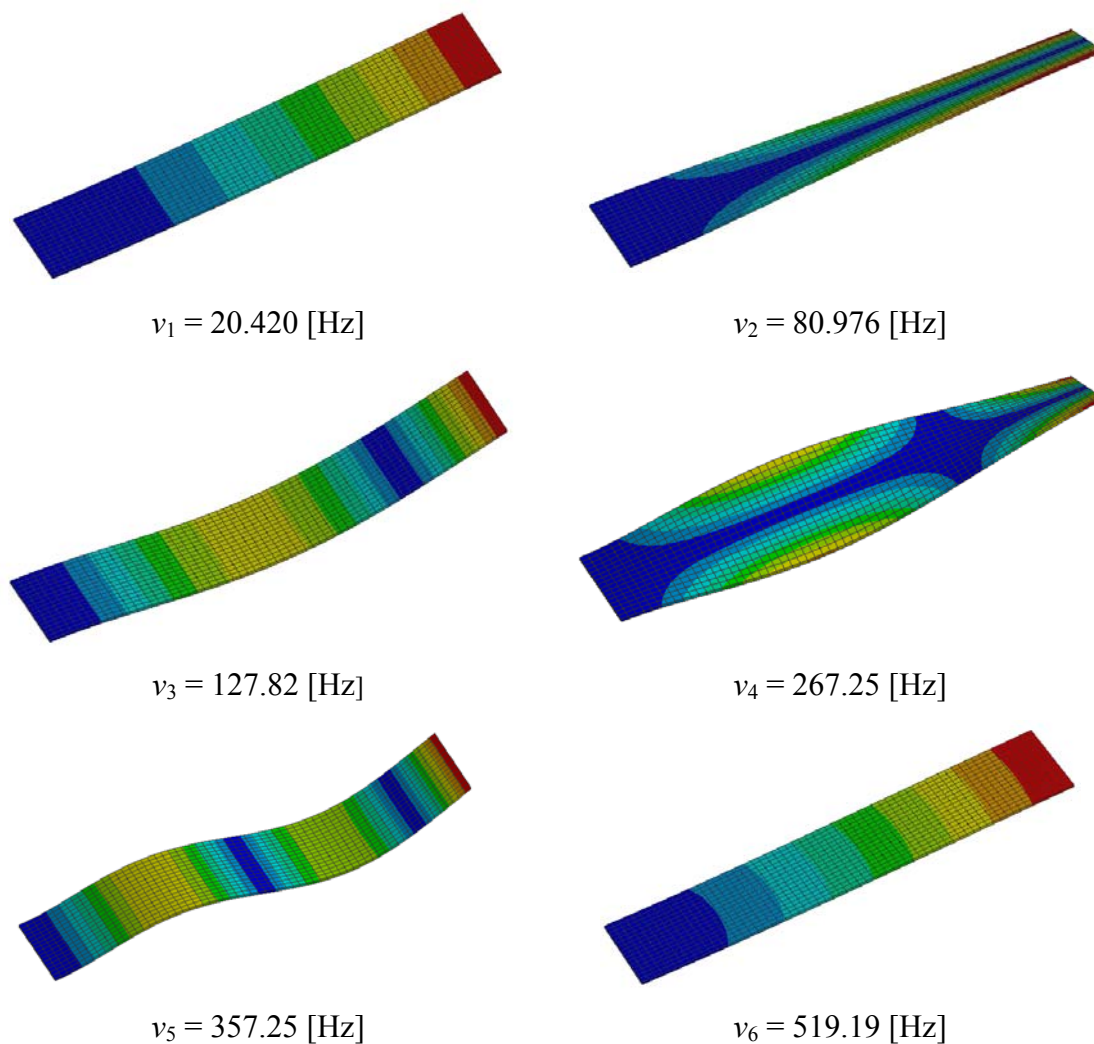
Слика 5.32. Добијени облици осциловања здраве плоче 3; модови савијања су 1, 2, и 4; увијања су 3. и 5; забацивања 6. мод



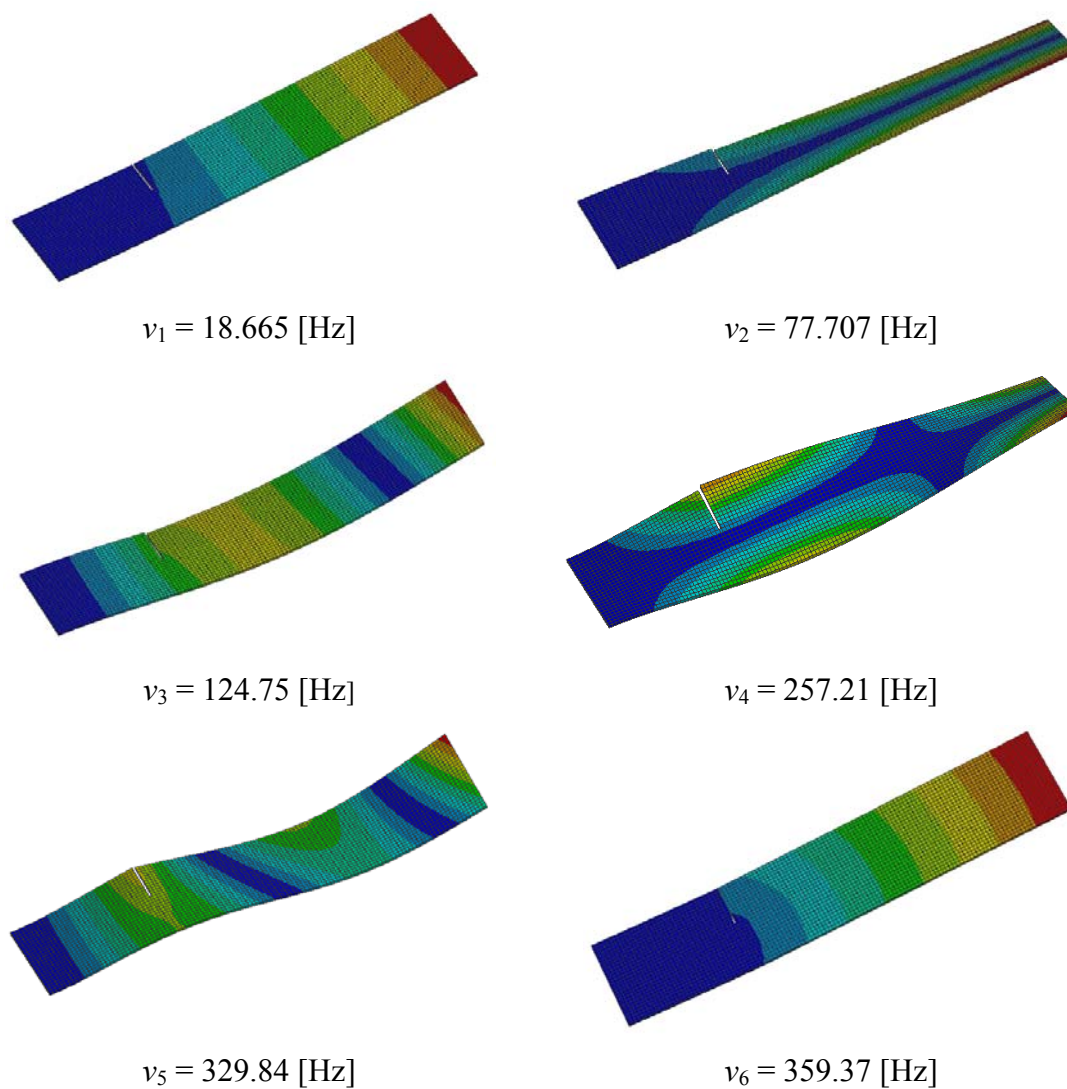


Слика 5.33. Добијени облици осциловања оштећене плоче 3; модови савијања су 1, 2. и 4; увијања су 3. и 6; 5. мод одговара савијању у равни плоче

Плоча 4 – Симетрични тип ($0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$)

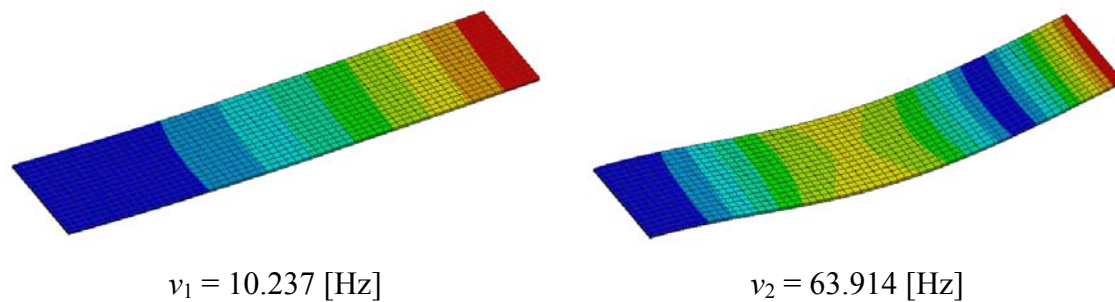


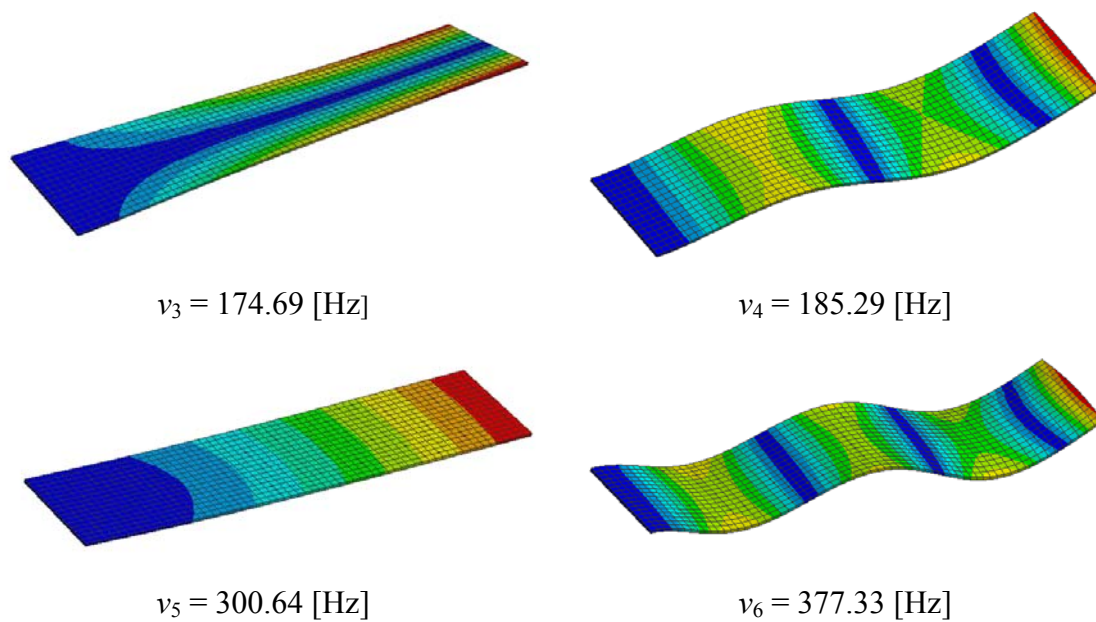
Слика 5.34. Добијени облици осциловања здраве плоче 4; модови савијања су 1, 3. и 5; увијања су 2. и 4; забацивања је 6. мод



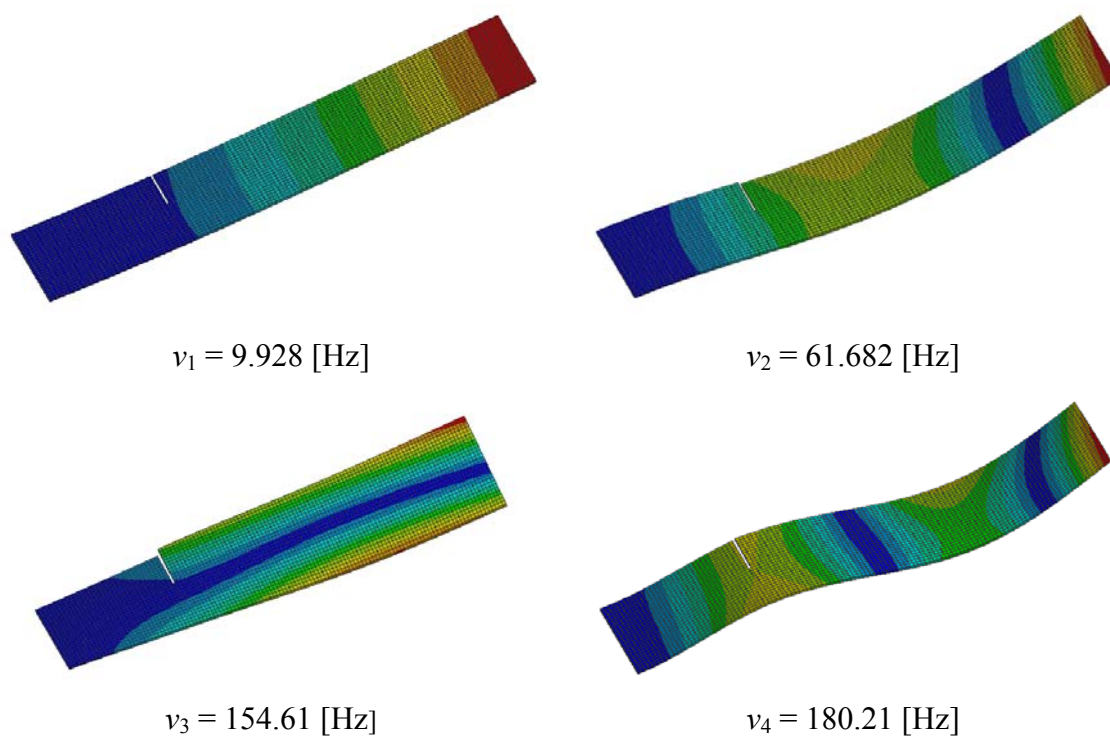
Слика 5.35. Добијени облици осциловања оштећене плоче 4; модови савијања су 1, 3. и 5; увијања су 2. и 4; 6. мод одговара савијању у равни плоче

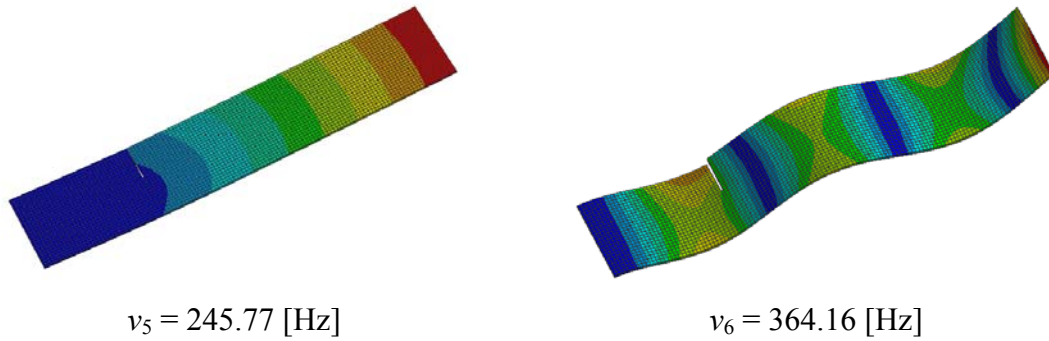
Плоча 5 – Симетрични тип (+45°/-45°/+45°/-45°/-45°/+45°/-45°/+45°)





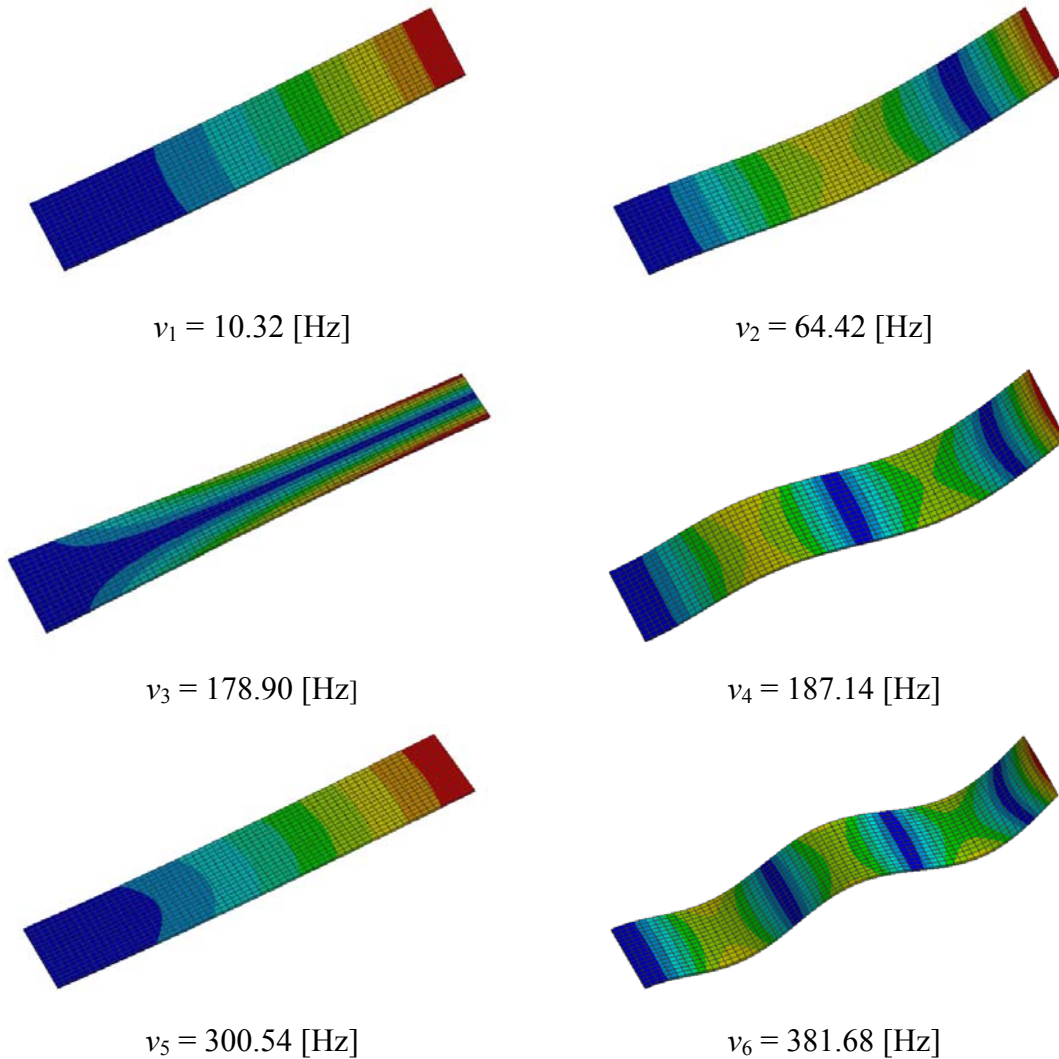
Слика 5.36. Добијени облици осциловања здраве плоче 5; модови савијања су 1, 2, 4. и 6; увијања је само 3; и забацивања 5. мод



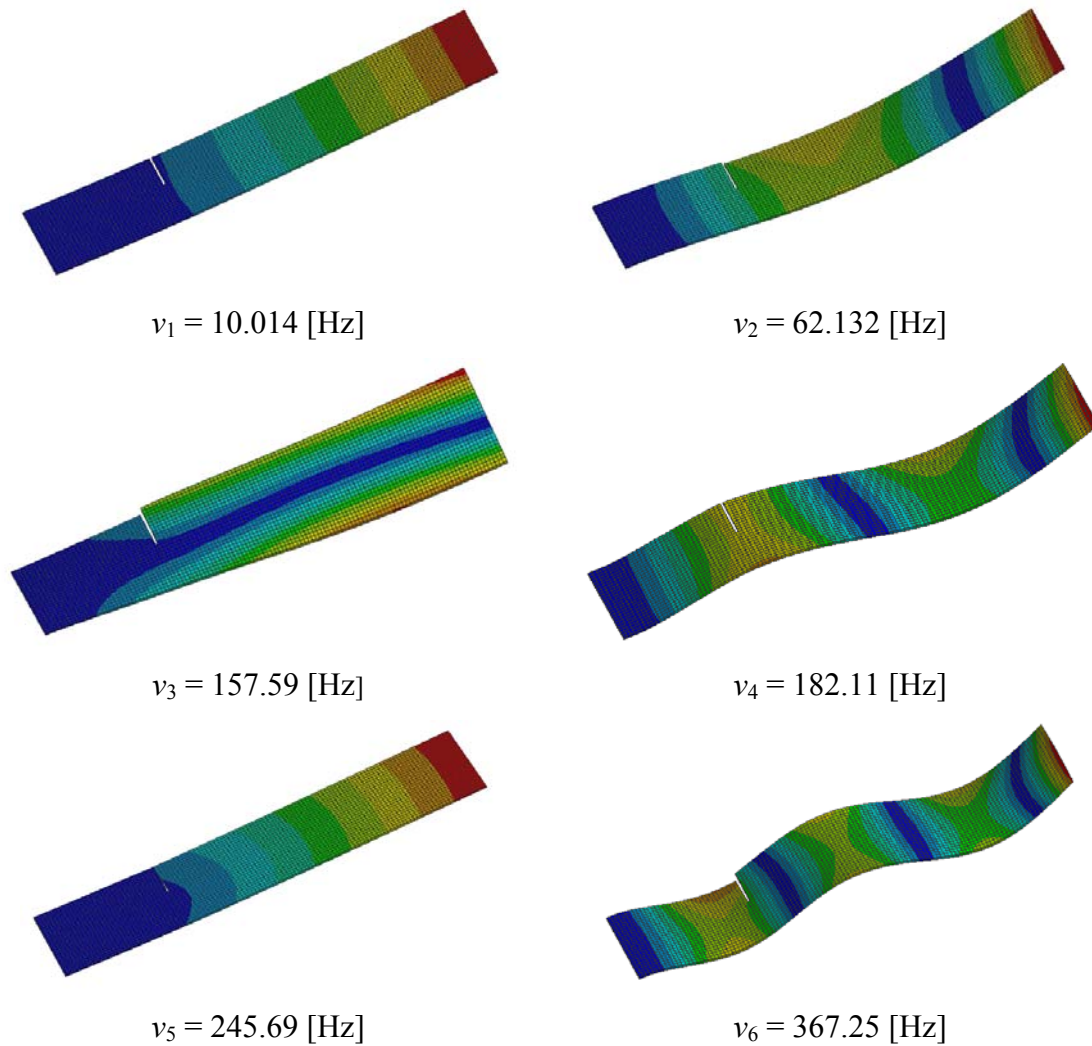


Слика 5.37. Добијени облици осциловања оштећене плоче 5; модови савијања су 1, 2, 4. и 6; увијања је 3. док 5. мод одговара савијању у равни плоче

Плоча 6 – Анти-симетрични тип (+45°/-45°/+45°/-45°/+45°/-45°/+45°/-45°)



Слика 5.38. Добијени облици осциловања здраве плоче 6; модови савијања су 1, 2, 4. и 6; увијања је 3. и забацивања 5. мод



Слика 5.39. Добијени облици осциловања оштећене плоче 6; модови савијања су 1, 2, 4. и 6; увијања је 3.; 5. мод одговара савијању у равни плоче

5.5.3 Дискусија

Табеле 5.10-15 приказују све анализирани резултате, експерименталне и нумеричке, који одговарају и здравим и оштећеним плочама. Табеле су приказане појединачно за сваки тип плоче пре и након оштећења. Одступања која се јављају између експерименталних и нумеричких вредности, могу се објаснити нерегуларностима стварне структуре (нпр. при процесу производње композитних плоча, односно при слагању слојева у ламинатима, није могуће добити идеалну геометрију, јављају се неправилности у виду храпавости површине или малих зазора између слојева приликом лепљења). Такве нерегуларности је тешко

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

нумерички симулирати идеалном геометријом, што је и приметно у вредностима одступања. Промене у вредностима сопствених фреквенција су јасно уочљиве у првим савојним и торзионим модовима.

Плоча 1 – Унидирекциони тип (0°)

Плоча 1, као најкрућа, показала се најтежом за спровођење експерименталних мерења. Први савојни мод је доминантан, независно од тачке удара, док се сви остали, виши тонови изузетно брзо пригушују те их је тешко издвојити из шума сигнала. Ова појава је видљива и на слици 5.17а где се јасно види значајна разлика у амплитудама првог у односу на више тонове. У случају здраве плоче, након вишеструко поновљених мерења, успело се у документовању прва три мода осциловања као што је и приказано у табели 5.10. Поређењем експерименталних са нумеричким вредностима фреквенција здраве структуре, уочава се тенденција раста девијације између два низа резултата код 1. и 2. мода ($\Delta\nu_1 \approx 0$ Hz, $\Delta\nu_2 \approx 3$ Hz), док се опет у трећем смањује на $\Delta\nu_1 \approx 1$ Hz. Односно, савојне модове је могуће измерити са већом тачношћу.

У случају оштећене плоче, приликом извођења експеримента, односно при увођењу динамичког оптерећења, дошло је настанка новог оштећења, прскотине дужине 8 cm. При механичком удару, плоча је напрсла на крајњем унутрашњем ћошку намерно начињеног хоризонталног оштећења и прскотина је наставила да се шири нагоре дуж нормалног правца на задато оштећење у виду зареза (баш у подужном правцу влакана). Иако је прслина примећена, није нумерички симулирана, јер зарез коначне дебљине не одговара у потпуности реалном цепању материјала дуж влакана. Из тог разлога, и одступање експерименталних од нумеричких резултата је у овом случају нешто веће, $\Delta\nu_1 \approx 2$ Hz, мада је јасно регистровано значајно смањење вредности прве сопствене фреквенције, што указује на структуралне промене, односно могућу процену степена оштећења и одлуку о даљој евентуалној санацији. Код оштећене структуре било је могуће регистровати само 1. савојни мод. Остали пикови који су видљиви на слици 5.17б представљају само умношке првог, основног тона.

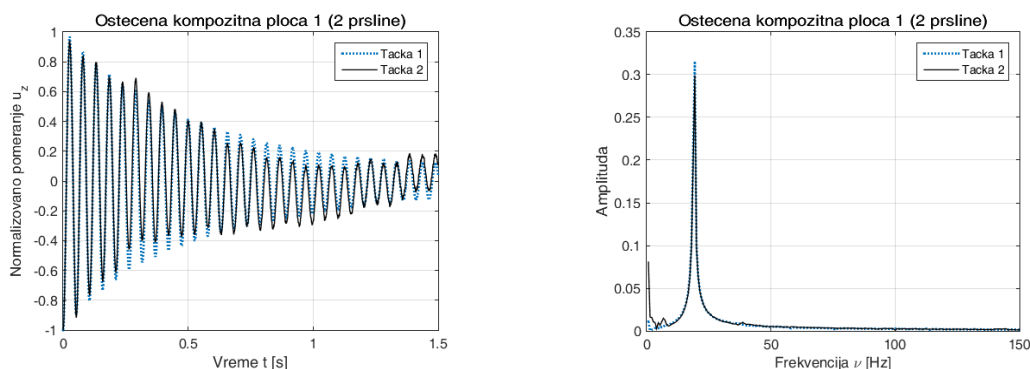
Са даљим вршењем (статичких) тестова, прслина је наставила да се шири и вертикално на доле, ка корену/укљештену крају. Иако таква оштећења нису била

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

првобитно планирана, извршене су динамичке анализе и овог стања плоче 1. које је у табели 5.10 означено као „оштећена (2 прслине)“. Иако је експерименталним мерењима било могуће регистровати само први савојни мод, примећује се даљи наставак тренда смањења сопствених фреквенција са продубљивањем оштећења структуре. Како је ово мерење извршено са мањом учестаношћу снимања, $FR = 1500 \text{ fps}$, било је могуће извршити нешто дужа мерења те је и тачност мерења повећана, $\Delta\nu = 0.3 \text{ Hz}$. Слика 5.40 илуструје одзиве две тачке овако оштећене плоче 1 у временском и фреквентном домену. Иако се тачка 2 налази на самом ободу мерне запремине (за разлику од тачке 1 која је у средини домена), слика 5.40 потврђује могућност правилног и тачног мерења и процене сопствене фреквенције из података добијених по целокупној мерној запремини.

Табела 5.10. Поређење првих сопствених фреквенција, здраве и оштећене плоче 1 добијене експерименталном и нумеричком методом

Мод	Метод	Здрава	Оштећена (1 прслина)	Оштећена (2 прслине)	Оштећена 3
ν_1 [Hz]	експериментални	24.0±0.5	19.5±0.5	19.2±0.3	16.6±0.6
	нумерички	24.21	21.63	21.63	19.77
ν_2 [Hz]	експериментални	80.0±0.5			
	нумерички	83.50			65.67
ν_3 [Hz]	експериментални	150.0±0.5			
	нумерички	151.51			125.09



Слика 5.40. Одзиви оштећене (2 прслине) плоче 1 у временском и фреквентном домену

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

Плоча 2 – Симетрични квази-изотропски тип: $(90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ/-45^\circ/+45^\circ/90^\circ)$

Са друге стране, плоча 2 је веома различита од плоче 1. У питању је изразито еластична структура са ниским степеном пригушења. Прва два савојна мода су са лакоћом регистрована и на здравој и оштећеној структури, док је на здравој структури било могуће детектовати и трећи (1. торзиони) мод.

Табела 5.11. Поређење прве 3 сопствене фреквенције, здраве и оштећене плоче 2 добијене експерименталном и нумеричком методом

Мод	Метод	Здрава	Оштећена	Оштећена 2	Оштећена 3
ν_1 [Hz]	експериментални	9.0 ± 0.5	9.0 ± 0.5	8.1 ± 0.6	8.0 ± 0.5
	нумерички	9.76	9.40	9.17	8.95
ν_2 [Hz]	експериментални	59.0 ± 0.5	58.0 ± 0.5	57.7 ± 0.6	56.0 ± 0.5
	нумерички	61.026	60.55	59.39	57.97
ν_3 [Hz]	експериментални	122.5 ± 0.5			
	нумерички	128.72	121.66	117.26	112.04

Плоча 3 – Уравнотежени тип $(90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ)$

Табела 5.12. Поређење првих сопствених фреквенција, здраве и оштећене плоче 3 добијене експерименталном и нумеричком методом

Мод	Метод	Здрава	Оштећена	Оштећена 2	Оштећена 3
ν_1 [Hz]	експериментални	14.0 ± 0.5	13.0 ± 0.5	13.0 ± 0.5	11.9 ± 0.5
	нумерички	14.73	14.00	13.68	13.26
ν_2 [Hz]	експериментални	90.0 ± 0.5	88.0 ± 0.5	85.0 ± 0.5	75.5 ± 0.5
	нумерички	92.17	90.80	88.45	84.74
ν_3 [Hz]	експериментални				
	нумерички	131.26	122.22	117.70	111.85

Како су за производњу плоче 3 употребљене ламине исте оријентације као код плоче 2 (али у различитом редоследу), и понашање две структуре је слично. Без већих проблема експериментално су документована прва два савојна мода, али не и 1. торзиони мод. Такође, различит редослед ређања ламина битно утиче

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

на механичке карактеристике структуре, и значајно већа крутост плоче 3 огледа се и у већим вредностима сопствених фреквенција. Тачност измерених резултата је задовољавајућа јер разлика између два типа резултата не износи више од 2 Hz.

Плоча 4 – Симетрични тип ($0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$)

Плоча 4 је по механичким својствима најсличнија плочи 1, што се огледа и у приближним вредностима сопствених фреквенција и у самом одзиву структуре. Опет, 1. савојни мод је доминантан, док су друга два, а нарочито 1. торзиони (други мод) једва приметни и брзо пригушени. Из тог разлога, и тачност мерења виших тонова је нешто мања, $\Delta v_{2,3} \leq 5$ Hz, мада је карактер промене у потпуности детектован.

Табела 5.13. Поређење прве 3 сопствене фреквенције, здраве и оштећене плоче 4 добијене експерименталном и нумеричком методом

Мод	Метод	Здрава	Оштећена	Оштећена 2	Оштећена 3
v_1 [Hz]	експериментални	19.5±0.5	17.5±0.5	16.9±0.5	15.1±0.4
	нумерички	20.42	18.66	18.29	17.30
v_2 [Hz]	експериментални	75.0±0.5			63.2±0.4
	нумерички	80.97	77.70	74.90	71.61
v_3 [Hz]	експериментални	123.0±0.5	122.0±0.5	115.3±0.5	106.3±0.4
	нумерички	127.82	124.75	120.33	112.67

Плоча 5 – Симетрични тип ($+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ$)

У питању је еластична структура састављена само из ламина постављених под углом $+45^\circ$ и -45° . Одзив плоче је комплексан, састављен из два скоро равноправна основна облика – 1. и 2. савојног мода, слике 5.24-25. Тачност измерених резултата је задовољавајућа (≤ 2 Hz за други тон), мада ни на који начин није било могуће регистровати (ни побудити?) торзију плоче.

Плоча 6 – Анти-симетрични тип ($+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/-45^\circ$)

Последња плоча је најсличнија претходној, и нису примећене нарочите предности ни једног од два разматрана ређања.

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

Табела 5.14. Поређење првих сопствених фреквенција, здраве и оштећене плоче 5 добијене експерименталном и нумеричком методом

Мод	Метод	Здрава	Оштећена	Оштећена 2	Оштећена 3
v_1 [Hz]	експериментални	9.5±0.5	9.5±0.5	9.0±0.5	8.6±0.5
	нумерички	10.23	9.92	9.64	9.41
v_2 [Hz]	експериментални	61.5±0.5	60.0±0.5	59.0±0.5	56.8±0.5
	нумерички	63.91	61.68	60.55	58.68
v_3 [Hz]	експериментални				
	нумерички	174.69	156.61	148.52	134.36

Табела 5.15. Поређење првих сопствених фреквенција, здраве и оштећене плоче 6 добијене експерименталном и нумеричком методом

Мод	Метод	Здрава	Оштећена	Оштећена 2	Оштећена 3
v_1 [Hz]	експериментални	10.0±0.5	9.0±0.5	9.0±0.5	8.5±0.5
	нумерички	10.23	10.01	9.73	9.49
v_2 [Hz]	експериментални	60.0±0.5	58.0±0.5	57.0±0.5	55.0±0.5
	нумерички	64.41	62.13	61.09	59.41
v_3 [Hz]	експериментални				
	нумерички	178.9	157.59	151.70	137.52

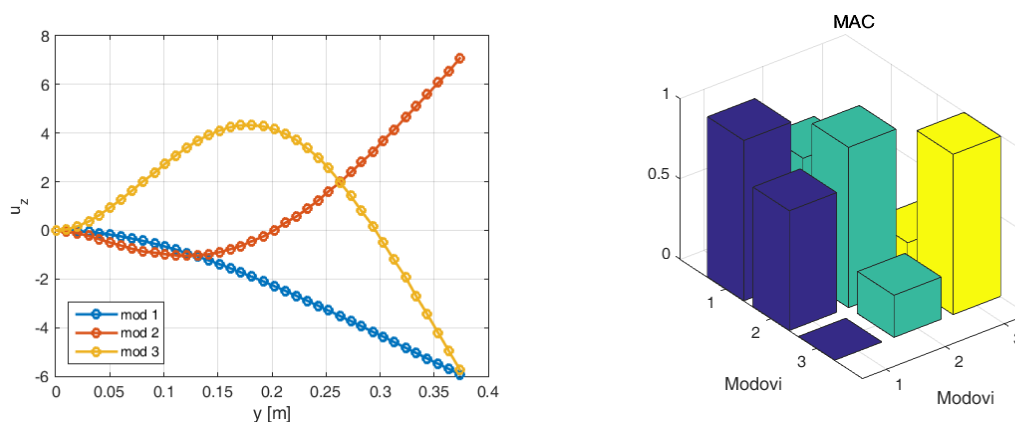
Коначна провера коју је могуће извести над сакупљеним подацима је провера облика осциловања (поред самих фреквенција при којима до њих долази). Један од могућих критеријума поклапања/корелације два мода осциловања је MAC (Modal Assurance Criteria). У питању је скаларна вредност која износи 1 за два идентична мода, и 0 за два различита ортогонална мода i и j :

$$MAC(\psi_i, \psi_j) = \frac{|\psi_i^T \cdot \psi_j|^2}{(\psi_i^T \cdot \psi_i)(\psi_j^T \cdot \psi_j)} \quad (5.1)$$

где ψ_i и ψ_j представљају два модална вектора који се упоређују чија димензија одговара броју степени слободе. У реалним конструкцијама могуће је вршити мерење или нумерички прорачун само у коначном броју тачака чиме се губе одређене информације о самом облику осциловања. Тако овај критеријум може

Глава 5: Експериментално испитивање DIC методом и нумеричка симулација фреквентних карактеристика композитних плоча пре и након оштећења

имати и вредности између 0 и 1 што је и приказано на слици 5.41 за нумеричке резултате извучене по дијагонали здраве плоче 1.



Слика 5.41. Прва три модална вектора здраве плоче 1 и усвојени критеријум њиховог међусобног поклапања

Додатно оштећење које је настало код прве плоче, услед постојећег већ задатог, указује на унидирекциони положај влакана дуж којег је настала прскотина. На основу резултата може се закључити да овај тип ламината, иако највеће носивости, показује највећу тенденцију ка даљем оштећењу и евентуалном отказу читаве структуре услед високе крутости и разлике карактеристика материјала у 3 просторна правца. Остали типови показују знатно већи степен еластичности, због слагања слојева под угловима од 45° или 90° , при чему унакрсно постављање ламина омогућава и бољу апсорпцију задатог оптерећења, па самим тим и већу отпорност ка оштећењу.

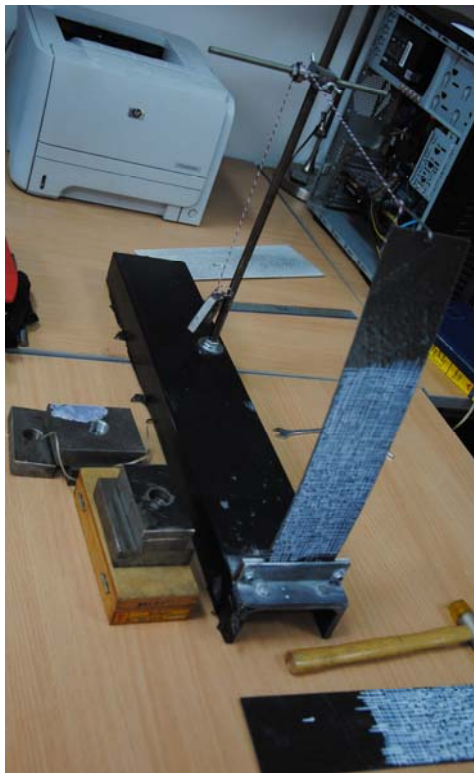
С обзиром да је релативно одступање између експерименталних и нумеричких резултата мање од 5% код нижих модова који су од интереса у инжењерској примени, овај поступак мерења је веома ефикасан у циљу уштеде у времену а високог степена прецизности резултата. Предност DIC поступка над осталим конвенционалним методама је посебно ефикасан код композитних структура где су оштећења и неправилности материјала тешко уочљиве визуелном инспекцијом, па је из снимљених слика могуће добити и поред тога податке о структури задовољавајуће тачности. Прорачун који је изведен у програмском пакету DIC система је од великог значаја и у одређивању карактеристика структуре и при мањим динамичким оптерећењима.

Глава 6

Верификација DIC поступка статичким ИСПИТИВАЊЕМ КОМПОЗИТНИХ ПЛОЧА

6.1 Увод

У овој глави описани експериментални метод биће примењен на статичко испитивање композитних плоча у циљу неке врсте провере у прецизности мерења и давања тачних резултата. Хронолошки, плоче су прво испитане статички и након утврђивања задовољавајућих добијених вредности, испитане динамички.



Слика 6.1. Испитна скела за статичко испитивање

6.2 Експериментално испитивање – статичка анализа

Плоче су оптерећене на чисто савијање и укљештене по доњој ивици. Уведена је сила која делује на горњој ивици од $F = 3.914 \text{ N}$, што одговара тегу масе $m = 400 \text{ g}$, слика 6.1.

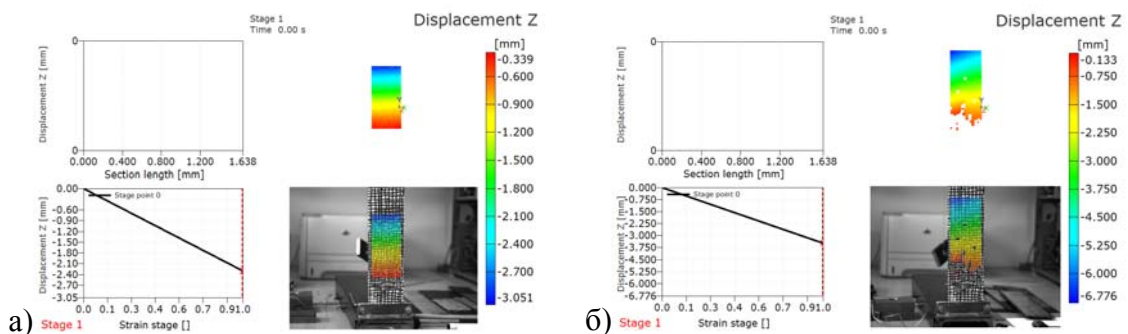
Померање се, при оваквом случају оптерећења, код идеалне, изотропне структуре може описати изразом:

$$u(y) = \frac{Fl^3}{6EI} \left(\frac{y}{l} \right)^2 \left[3 - \left(\frac{y}{l} \right) \right] \quad (6.1)$$

где $u(y)$ означава локално померање по z -правцу, F силу на крају плоче, l укупну дужину плоче, y подужну координату и EI савојну крутост плоче (правоугаоног попречног пресека) која представља производ модула еластичности E и геометријског момента инерције I за осу z . Како се понашање композитних структура у општем случају не може описати овим изразом, део статичког испитивања односио се и на проверу и упоређивање одговора анизотропних структура у односу на изотропне при истом случају оптерећења.

На слици 6.2 (и 6.4, 6.6, 6.8, 6.10, 6.12 за осталих 5 плоча) илустрована је плоча 1 са одговарајућим померањима, при савијању у z -правцу, а на сликама 6.3, 6.5, 6.7, 6.9, 6.11 и 6.13 дијаграми померања изабране тачке, позициониране на средини плоче на растојању 20 cm од доње, укљештене ивице.

Плоча 1 – Унидирекциони тип (0°)

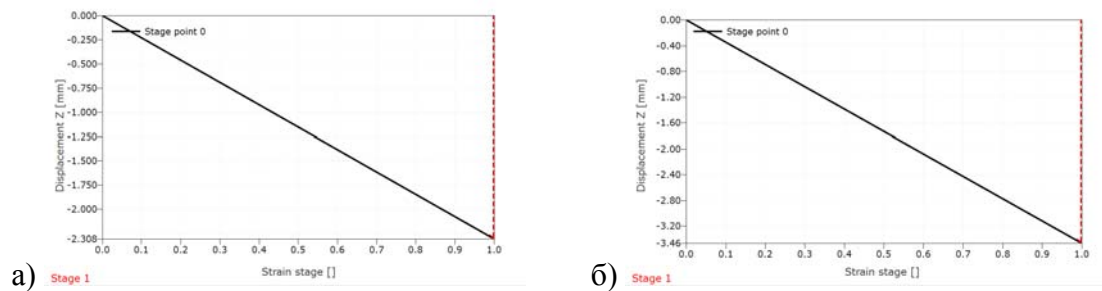


Слика 6.2. Резултујућа померања плоче 1 у z -правцу: а) здрава; б) оштећена

За разлику од динамичког испитивања где је потребан велики број снимака да би се правилно „ухватио“ одзив структуре, код статичког испитивања довољна су само два снимка за прорачун поља померања. Из тог разлога су и графици

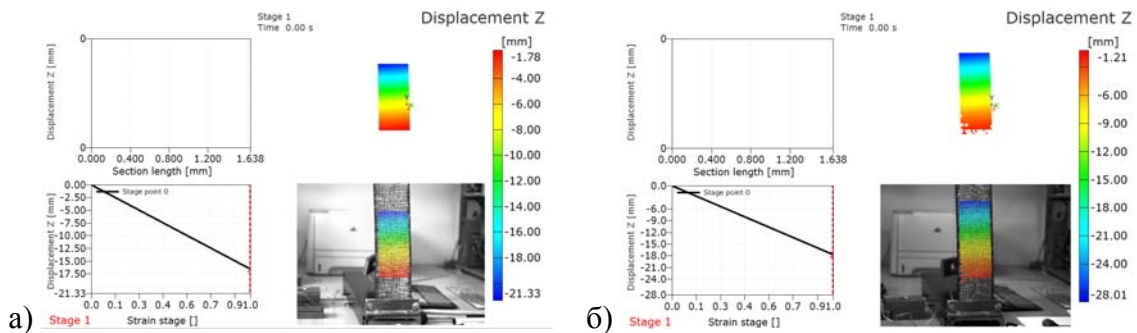
Глава 6: Верификација DIC поступка статичким испитивањем композитних плоча

померања изабране тачке линеарног облика, где нулто померање одговара 1. а коначно (стационарно, устаљено) померање 2. стејцу.

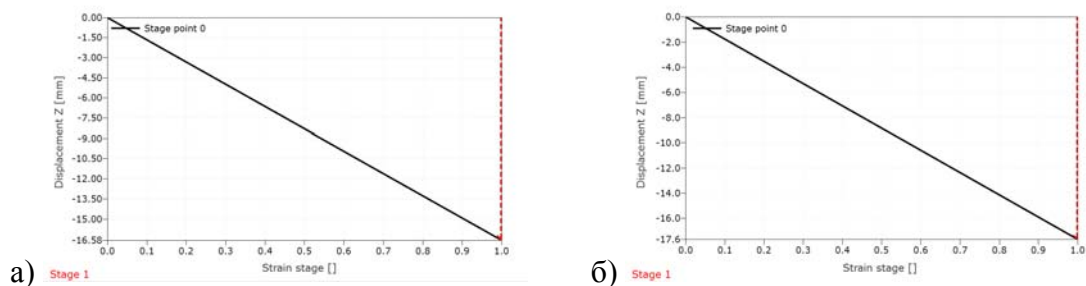


Слика 6.3. Графици померања изабране тачке на плочи 1: а) здрава; б) оштећена

Плоча 2 – Симетрични квази-изотропски тип: (90°/+45°/-45°/0°/0°/-45°/+45°/90°)



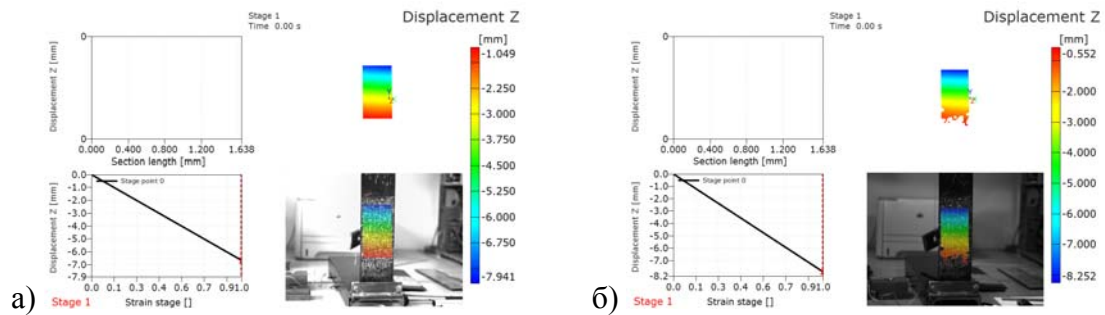
Слика 6.4. Резултујућа померања плоче 2 у z-правцу: а) здрава; б) оштећена



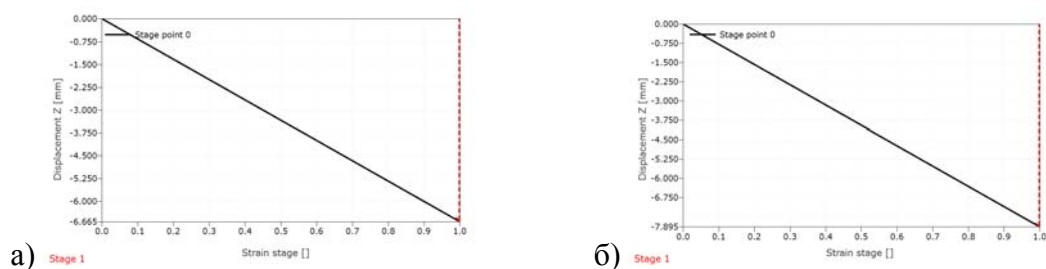
Слика 6.5. Графици померања изабране тачке на плочи 2: а) здрава; б) оштећена

Статичко мерење је изведено при минималној учестаности снимања од 1 fps без потребе коришћења додатног осветљења. Сви нанесени патерни су се показали једнако употребљивим чиме је и обрада резултата значајно олакшана, што се и види по величини анализираних мерних површина.

Плоча 3 – Уравнотежени тип ($90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ$)

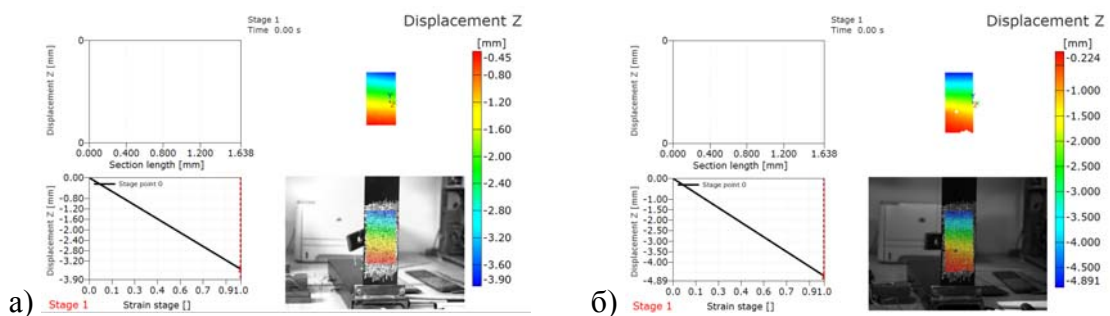


Слика 6.6. Резултујућа померања плоче 3 у z-правцу: а) здрава; б) оштећена

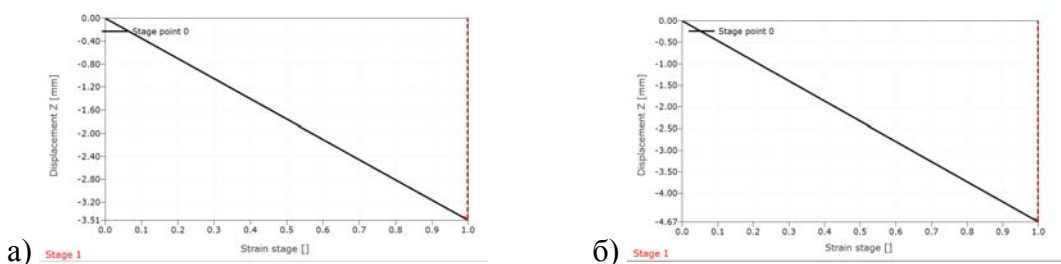


Слика 6.7. Графици померања изабране тачке на плочи 3: а) здрава; б) оштећена

Плоча 4 – Симетрични тип ($0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$)

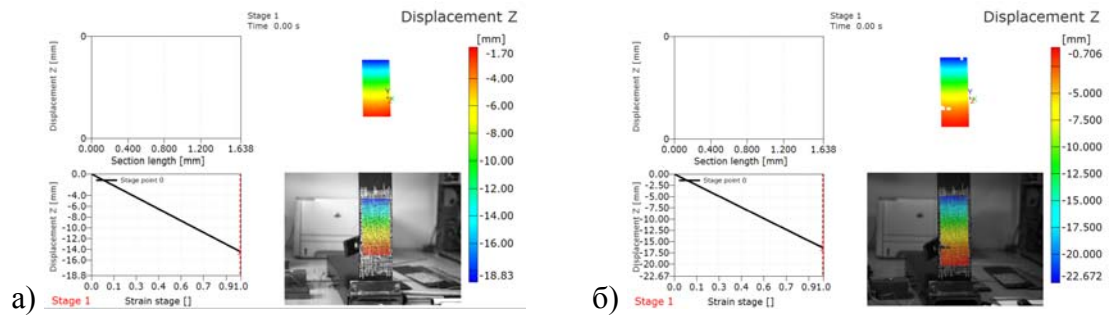


Слика 6.8. Резултујућа померања плоче 4 у z-правцу: а) здрава; б) оштећена

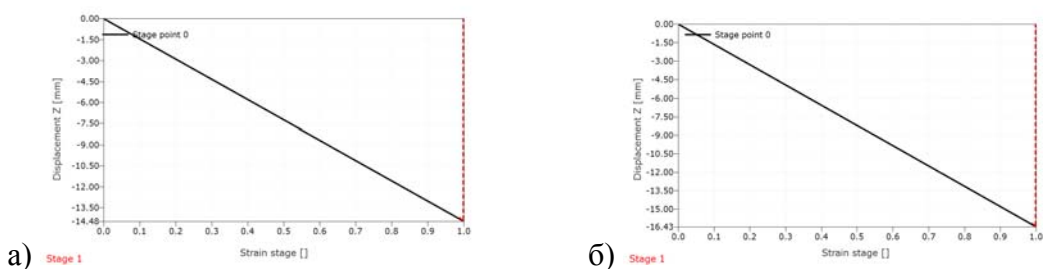


Слика 6.9. Графици померања изабране тачке на плочи 4: а) здрава; б) оштећена

Плоча 5 – Симетрични тип (+45°/-45°/+45°/-45°/-45°/+45°/-45°/+45°)

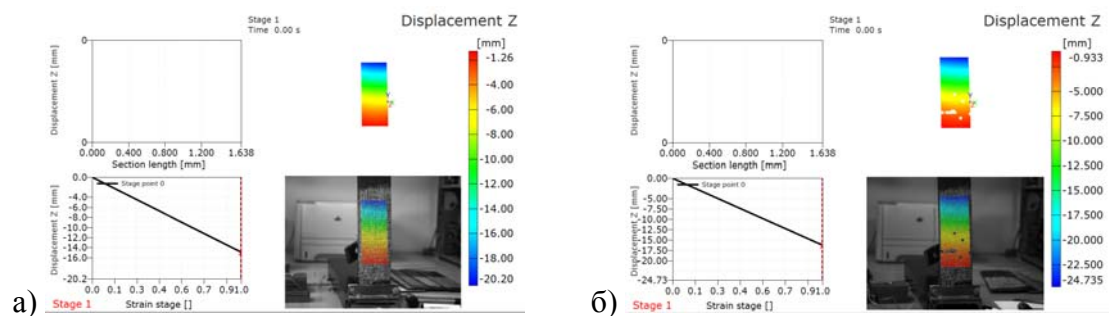


Слика 6.10. Резултујућа померања плоче 5 у z-правцу: а) здрава; б) оштећена

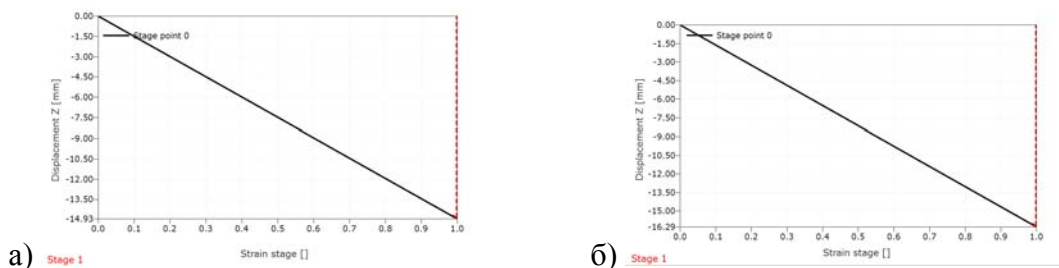


Слика 6.11. Графици померања изабране тачке на плочи 5: а) здрава; б) оштећена

Плоча 6 – Анти-симетрични тип (+45°/-45°/+45°/-45°/+45°/-45°/+45°/-45°)



Слика 6.12. Резултујућа померања плоче 6 у z-правцу: а) здрава; б) оштећена



Слика 6.13. Графици померања изабране тачке на плочи 6: а) здрава; б) оштећена

6.3 Дискусија резултата

Греда је веома заступљени структурни елемент у машинству. Да би се правилно предвидело њено понашање при различитим оптерећењима (затезању, савијању, увијању или њиховој комбинацији) потребно је познавање њених механичких карактеристика. Међутим, у случају композитних греда (неизотропни материјали, различита ређања ламина) одређивање механичких карактеристика није праволинијско. У питању је велики број информација (нпр. модули еластичности и клизања за сваки правац за сваки слој итд.) који је потребно свести на неки, глобални параметар који би пружио брзи увид у понашање структуре при основном, базичном случају оптерећења.

На основу измерене вредности померања референтне тачке изабране у средишту плоче на удаљености 20 cm од укљештеног краја израчунате су „еквивалентне“ вредности савојне крутости сваке плоче које би одговарале идеалној плочи истих димензија али израђеној из изотропног материјала, табеле 6.1 и 6.2.

Табела 6.1. „Еквивалентне“ вредности савојне крутости EI и модула еластичности E здравих плоча

Плоча	u_z [mm]	EI [Nmm ²]	E [GPa]
1	2.308	10.654	115.61
2	16.580	1.483	16.09
3	6.665	3.690	40.03
4	3.510	7.005	76.02
5	14.480	1.698	18.43
6	14.930	1.647	17.87

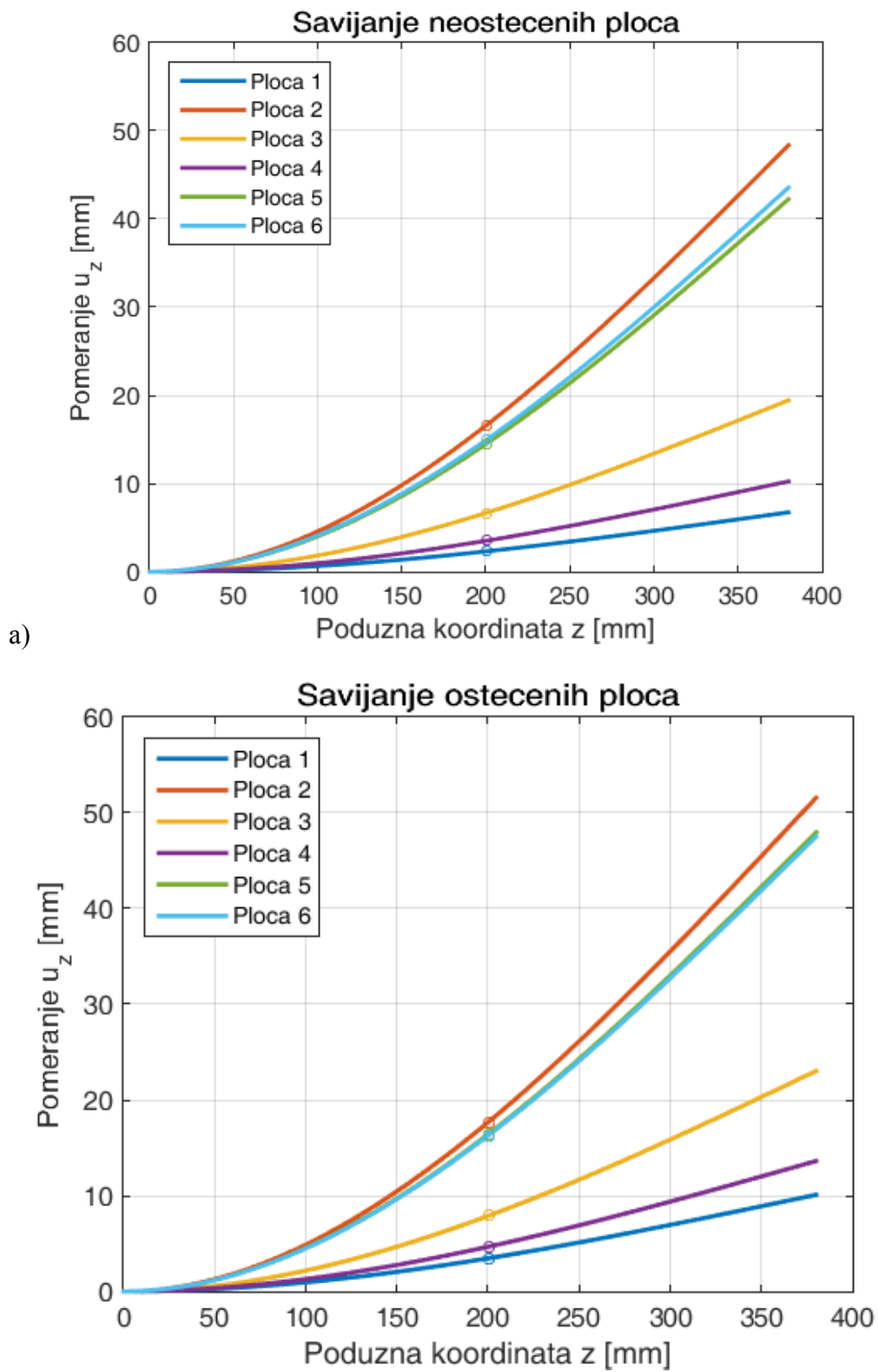
Иако овај параметар не представља физичку карактеристику плоча показао се корисним при поређењу понашања композитних плоча различито оријентисаних слојева када су подвргнуте истом случају оптерећења. На основу његове вредности стиче се брзи прелиминарни увид у крутост плоче (која има значајан утицај на понашање структуре након првог појављивања оштећења). Даље је могуће израчунати и „еквивалентни“ модул еластичности E који је у

случају прве унидирекционе плоче веома близак вредности модула еластичности једне ламине (табела 5.9) чиме је потврђена валидност ових осредњених параметара.

Табела 6.2. „Еквивалентне“ вредности савојне крутости EI и модула еластичности E оштећених плоча

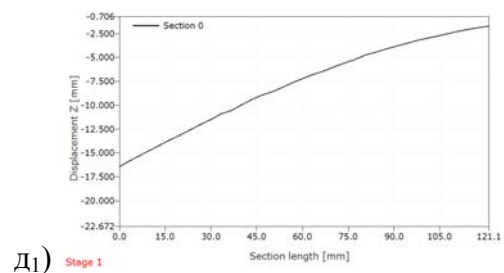
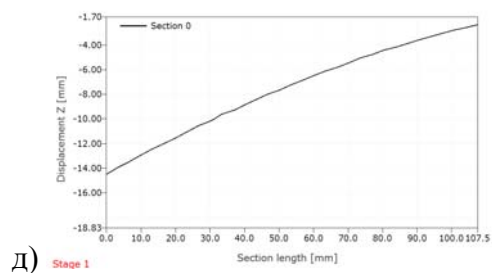
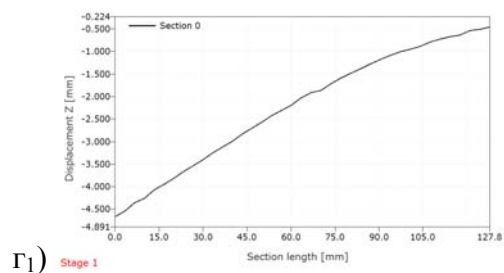
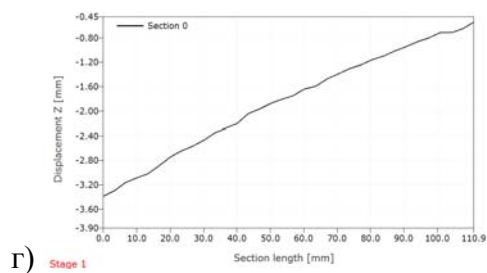
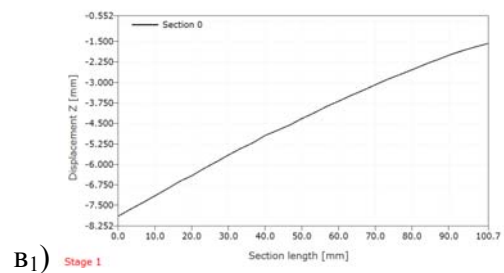
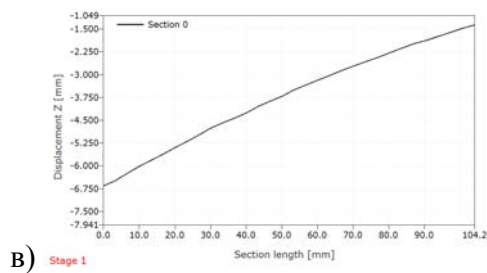
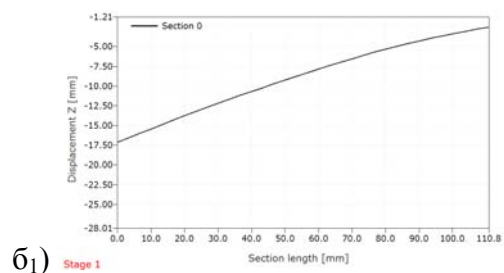
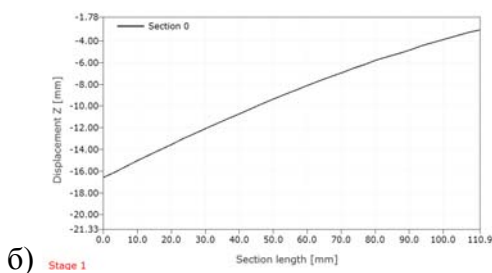
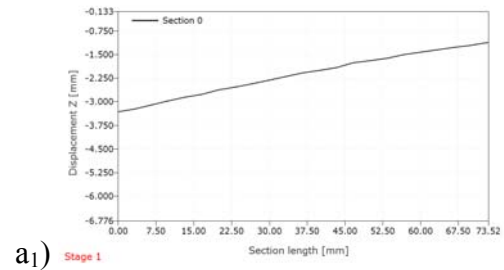
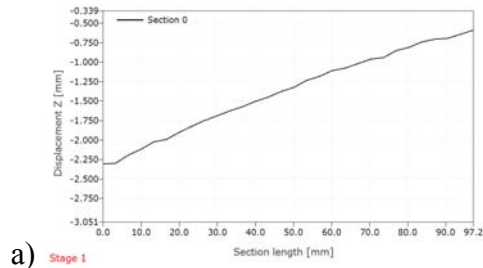
Плоча	u_z [mm]	EI [Nmm ²]	E [GPa]
1	3.460	7.107	77.12
2	17.677	1.391	15.09
3	7.895	3.115	33.80
4	4.670	5.266	57.14
5	16.430	1.497	16.24
6	16.290	1.510	16.38

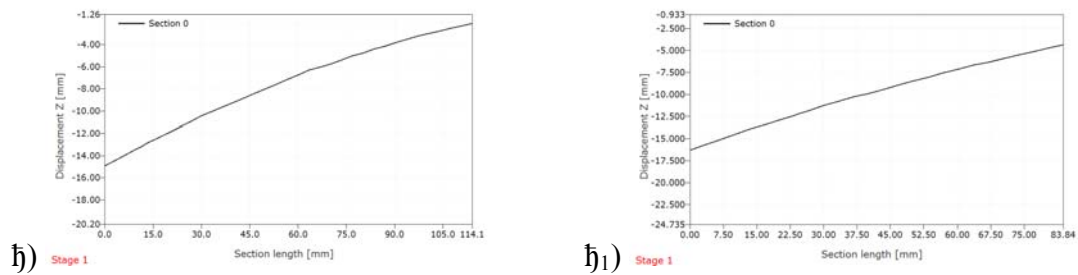
Слика 6.14 илуструје померања изабране тачке, где свака крива дефинише степен савијања одређене плоче. Линија обојена плавом бојом приказује савијање прве плоче (унидирекционе оријентације слојева), при чему се уочава да она поседује највећу вредност крутости. Плоча 4 (означена љубичастом бојом), са конфигурацијом слојева ($0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$), се најсличније понаша унидирекционом типу и са релативно великом вредношћу крутости, показује тенденцију ка лакшем настанку прслине, односно ширењу оштећења. Највеће вредности померања одговарају плочи 2 ($90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ/-45^\circ/+45^\circ/90^\circ$), означеној црвеном бојом, што одговара и највећем степену еластичности при савијању у z-правцу. Плоче 5 и 6 (симетричне и анти-симетричне конфигурације слојева) се најсличније понашају и показују релативно већи степен еластичности, а мало су нижих вредности од плоче 2. Уравнотежени тип-плоча 3 се налази на средини, при чему вредности померања одговарају некој средњој вредности померања плоча 1 и 2.



Слика 6.14. Дијаграми померања плоча при савијању: а) здрава, б) оштећена

На слици 6.15 су приказана померања плоча за изабран низ тачака у у-правцу у циљу провере хомогености структуре и евентуалних одступања од еквивалентних вредности.

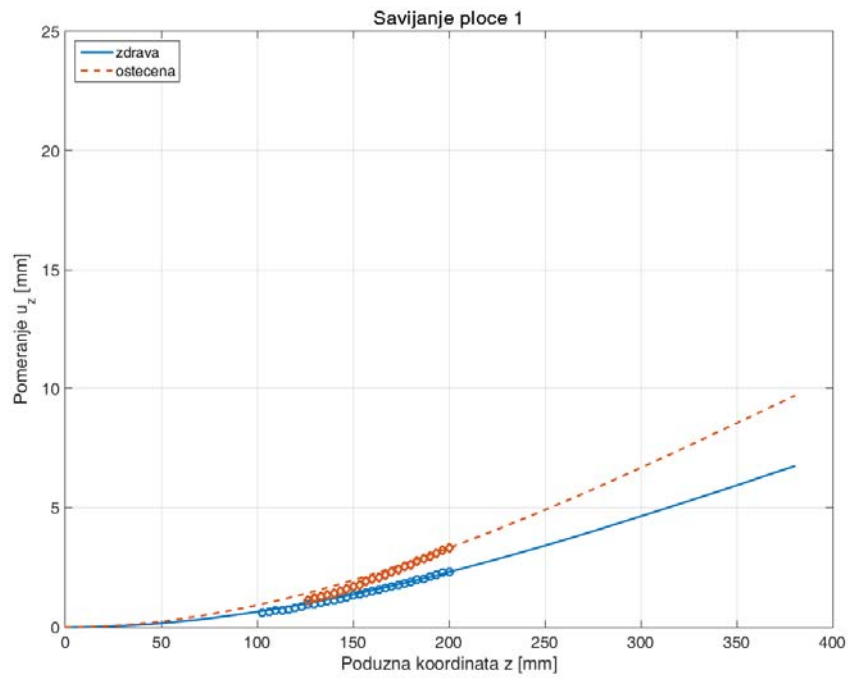




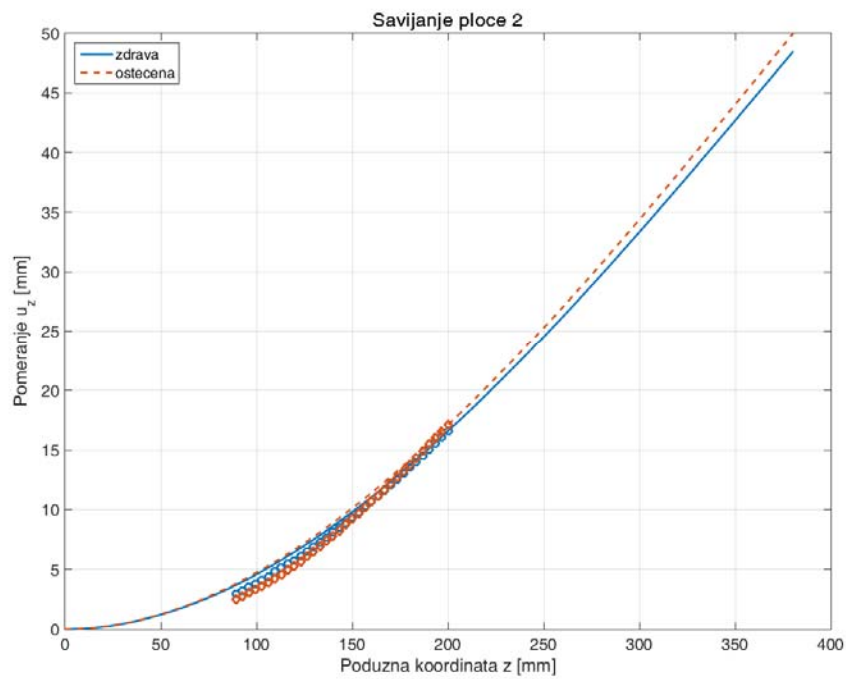
Слика 6.15. Дијаграми померања низа тачака у z-правцу плоча 1-6; а-ђ) здрава, а₁-ђ₁) оштећена

На основу приказаних резултата, вредности савојне крутости и модула еластичности, за произвољно изабрану тачку, су приближне дефинисаним вредностима изотропне структуре. Међутим, након одабира низа тачака у у-правцу, понашање плоча се мења и не може се апроксимирати вредностима идеалне структуре. Уочава се веће одступање у резултатима због нехомогености композитних плоча, слика 6.16.

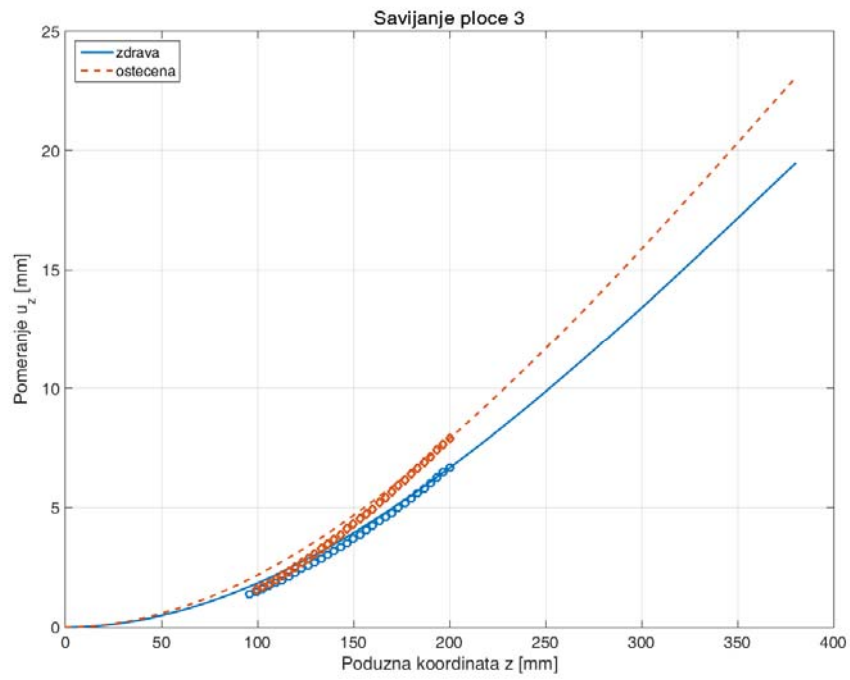
Једино прва (унидирекциона) и четврта неоштећена плоча у потпуности прате предвиђени тренд понашања идеалне структуре (полиномна зависност 3. степена) јер код њих доминантну носећу улогу врше влакна постављена под нултим углом. Остале четири плоче видљиво одступају од кубне функције, а нарочито у кореном делу где су измерена померања мања од идеалних. Разлика се повећава увођењем оштећења, јер се померања кореног дела пре зареза смањују, а остатка структуре после зареза повећавају. Тако је коначно и дошло до даљег ширења прслине код плоче 1 описаног у претходној глави.



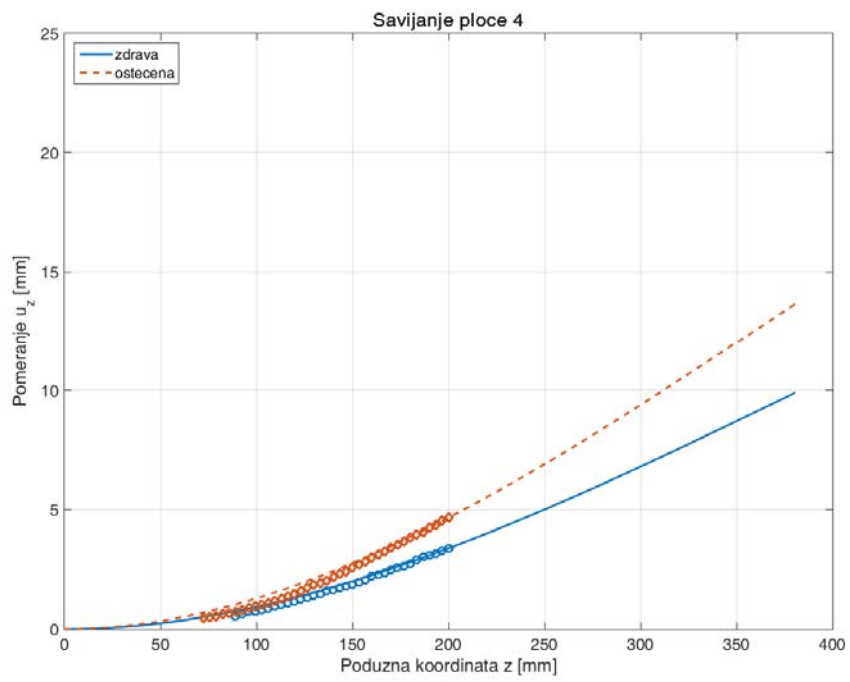
a)



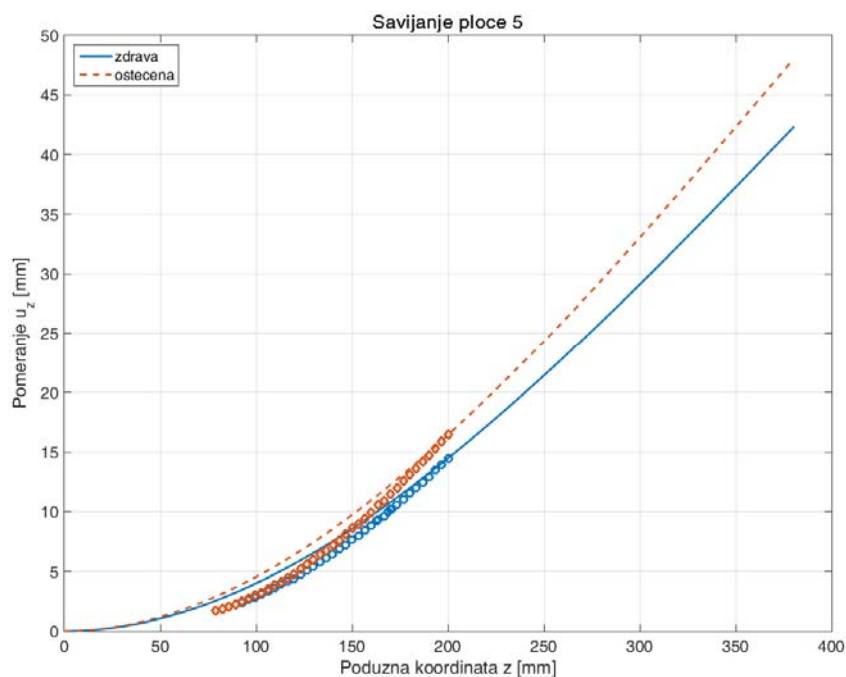
б)



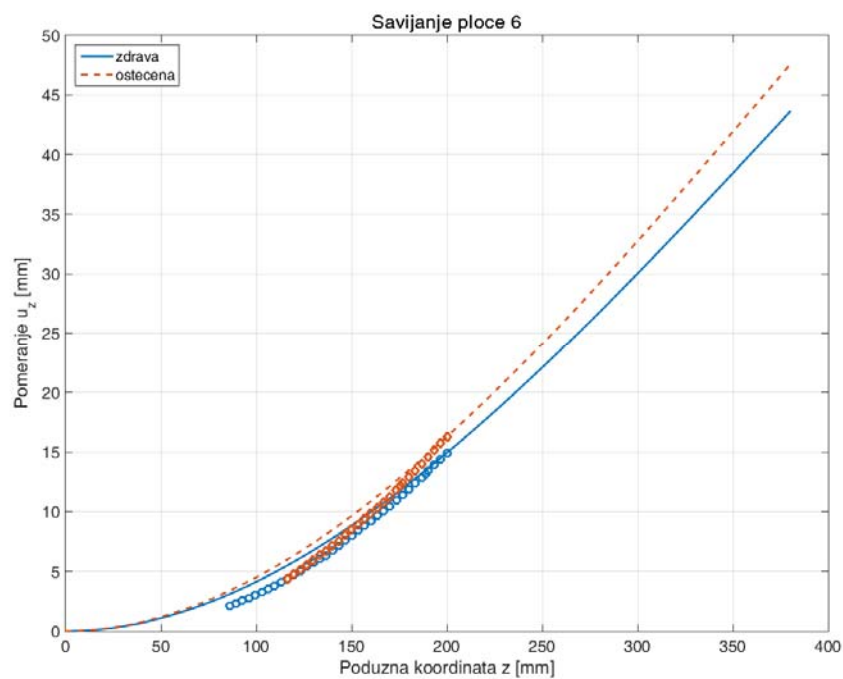
В)



Г)



д)



ђ)

Слика 6.16. Графици одступања вредности померања изабраног низа тачака од апроксимираних: а) плоча 1; б) плоча 2; в) плоча 3; г) плоча 4; д) плоча 5; ђ) плоча 6

Глава 7

Закључак

7.1 Резултати истраживања

Предмет истраживања докторске дисертације је утврђивање утицаја оштећења на динамичке карактеристике композитних лопатица ротора ветротурбина, односно, постављање релација између тренутног стања композитне структуре и њених модалних карактеристика. Да би се правилно утврдила поменута зависност потребно је познавати параметре исправне структуре, пратити - мерити или израчунавати тренутне параметре и извести закључке о исправности и функционалности. Основна идеја структуралног праћења фреквентних карактеристика је у модалним параметрима, посебно фреквенцијама и облицима модова који представљају физичке карактеристике структуре (маса, пригушење, крутост). Према томе, промене у физичким карактеристикама као што је смањење крутости су резултат низа прскотина или губитка везе што изазива и видљиве промене у модалним карактеристикама. Структурално оштећење је базирано на поређењу „одговора“ у стању структуре пре и након оштећења. Док промене у модалним карактеристикама служе као индикатори оштећења, процес заснован на овом принципу смањује време испитивања. Композитне структуре-епрувете сегмента рамењаче лопатице ветротурбине, су након експерименталног испитивања упоређене са коресподентним моделом добијеним методом коначних елемената и анализирани. На основу упоредних резултата екперименталне и нумеричке методе, описана је дискусија остварених резултата на основу које се може предложити евентуална модификација система у циљу боље функционалности и исправности читаве конструкције.

Оптички мерни систем за дигиталну корелацију слике (DIC) као савремен метод експерименталног испитивања омогућава добијање резултата испитаних параметара у веома кратком временском интервалу. На тај начин, промене модалних карактеристика пре и након оштећења, дају брзу процену идентификације и могућност брзог реаговања у смислу санације и спречавања даљег ширења. Истраживање у овој тези је мотивисано великим предностима које примењен метод има у односу на конвенционалне методе експерименталног испитивања, посебно у формирању алгорита за праћење понашања композитних структура. Током истраживања остварени су следећи резултати:

- Формирана је сопствена, помоћна лабораторијска инсталација за извођење експеримента - мерна испитна скела, у циљу прилагођавања тестираних епрувета мерној опреми DIC система.
- Развијена је сопствена методологија експерименталног испитивања посебно намењена одређивању фреквентних карактеристика композитних ламината. Под тиме се подразумева, правилна припрема тестираног узорка са наношењем одговарајућег патерна, интензитет и ниво осветљења, приказ локације извођења побуде и трајање временског интервала снимања одзива са одговарајућом учестаношћу. Током испитивања, при побуђивању вршене су различите пробе одабира тачке саме побуде где се дошло до закључка, да управо локација и место удара имају велики утицај у „хватању“ сопствених фреквенција структуре.
- Добијени дијаграми померања у временском домену су Фуријеовим трансформацијама преведени у фреквентни домен, при чему су израчунате и приказане вредности сопствених фреквенција свих 6 плоча пре и након оштећења. При том су развијени сопствени кодови за целокупну допунску анализу резултата.
- Генерисане су прорачунске мреже модела алуминијумских и композитних плоча и спроведен нумерички прорачун методом коначних елемената у програмском пакету ANSYS, а вредности сопствених фреквенција одређене у модулу модалне анализе. Облици модова осциловања и вредности сопствених фреквенција су одређени и приказани за свих 6 плоча, у иницијалном стању и након оштећења.

- Извршена је упоредна анализа остварених експерименталних и нумеричких резултата који одговарају здравим и оштећеним плочама. Одступања која се јављају између експерименталних и нумеричких вредности се могу објаснити нерегуларностима стварне структуре (нпр. при процесу производње композитних плоча, односно при слагању слојева у ламинатима, није могуће добити идеалну геометрију, јављају се неправилности у виду храпавости површине или малих зазора између слојева приликом лепљења).
- Промене у вредностима сопствених фреквенција су јасно уочљиве у првим савојним и торзионим модовима плоча пре и након оштећења.
- С обзиром да је релативно одступање између експерименталних и нумеричких резултата мање од 5% код нижих модова који су од интереса у инжењерској примени, овај поступак мерења је веома ефикасан у циљу уштеде у времену а високог степена прецизности резултата.
- Приликом извођења једног од експеримента, код оштећене плоче 1 (унидирекциони тип), дошло је до настанка новог оштећења, прслине дужине 8 cm. При механичком удару, плоча је напрсла мало изнад хоризонталног оштећења и прскотина је наставила да се шири нагоре дуж нормалног правца на задато у виду зареза (баш у подужном правцу влакана). На основу резултата може се закључити да овај тип ламината, иако највеће носивости, показује највећу тенденцију ка даљем оштећењу и евентуалном отказу читаве структуре услед високе крутости и разлике карактеристика материјала у 3 просторна правца.
- У циљу алтернативне провере исправности као и додатног нивоа примене DIC методе, плоче су изложене статичком оптерећењу, савијању у z-правцу. Приказани су резултати добијених померања и извршена процена валидације вредности савојних крутости и модула еластичности са еквивалентним. Описан је утицај нехомогености композитних ламината на понашање плоча и одступања статичких параметара од идеалне структуре. На основу добијене вредности савојне крутости, стиче се брзи прелиминарни увид у крутост плоче која знатно утиче на понашање структуре након првог појављивања оштећења.

7.2 Научни доприноси дисертације

Динамичке карактеристике композитне структуре могу бити окарактерисане познавањем сопствених фреквенција и облика осциловања. Постављањем релација које повезују оштећења и динамичке карактеристике система – композитне структуре, могуће је пратити појаву и степен оштећења конструкције. Током истраживања остварени су резултати који ће бити корисни за даља истраживања у области динамике композитних структура и лопатица ветротурбина, система за праћење радне способности и предвиђање потребног периодичног одржавања конструкције, као и пројектовања композитних делова као класичних и паметних структура. У истраживању су систематизоване методе експерименталног и нумеричког прорачуна статичких и динамичких карактеристика и критеријума који омогућавају дефинисање утицаја оштећења на поменуте карактеристике.

У току израде дисертације је остварен научни допринос посебно у области експерименталног рада. Урађена је верификација нумеричких анализа на основу постигнутих експерименталних резултата, што је допринело развоју система за одређивање утицаја оштећења на динамичке карактеристике композитних структура, методама обраде података и корелације са нумерички добијеним резултатима. Такође, научни допринос се очекује у области развоја и имплементације алгорита за праћење стања композитних лопатица у смислу постављања критеријума за идентификацију нивоа оштећења према одређеним динамичким карактеристикама композитне структуре. Истраживачки рад у току израде дисертације је довео до следећих научних доприноса:

- Систематизација метода одређивања динамичких карактеристика композитне структуре.
- Модификовање и побољшање постојећих методологија експерименталног испитивања и развој нових, посебно прилагођених испитивању фреквентних карактеристика композитне структуре.
- Идентификација и продубљивање разумевања понашања композитне структуре пре и после настанка оштећења, што утиче на дефинисање структуре и процену степена издржљивости при дејству статичких и динамичких оптерећења у току дугог радног века.

- ➔ Метода корелације резултата нумеричке симулације и остварених резултата може се успешно применити при развоју алгорита за праћење стања понашања структуре.
- ➔ Остварени стручни резултати се могу поред класичних, применити при моделирању, прорачуну и испитивању паметних композитних структура.
- ➔ Предложена методологија на основу постигнутих резултата, може се са великом прецизношћу применити у различитим областима истраживања и решавању практичних инжењерских проблема

7.3 Препоруке за будући рад

У току истраживања, унапређене су методе одређивања динамичких карактеристика, као и методе раног утврђивања и детектовања оштећења композитних структура, које су од изузетног значаја у примени код сложених композитних конструкција какве су лопатице ветротурбина. Модалне карактеристике (сопствене фреквенције и модови осциловања), експериментално одређене пре и након оштећења, са великом сигурношћу су релевантне за даљу одлуку о евентуалној санацији, што доприноси знатно већој уштеди у новцу (структуре израђене од композитних материјала су релативно скупе, тако да евентуална санација након процене степена оштећења буде економичнија од замене потпуно новог дела). Такође, увођењем неконвенционалног поступка при одређивању потребних параметара, знатно је скраћено време тестирања и омогућена брза процена исправности структуре без потребе додатног дејства на саму структуру. Добијени експериментални резултати током истраживања валидирају примењени поступак и развијену методологију у овој дисертацији, те се очекује успешна примена и код паметних композитних структура, што може бити правац будућег истраживања. На основу искуства стеченог приликом израде ове дисертације, у циљу даљег развоја и унапређења структуралног праћења модалних карактеристика композитних структура, могу се навести препоруке за даљи истраживачки рад:

- ➔ Предложену методологију структуралног праћења фреквентних карактеристика у наредним истраживањима требало би стандардизовати и

- имплементирати у софтвер/алгоритам за предвиђање појаве оштећења (нпр. које би довело до појаве деламинације или микро-фрактура влакана).
- ➔ Развијене кодове могуће је унапредити и за процесирање већег броја података (нпр. потпуни облик осциловања, коефицијенти пригушења итд.) добијених и на напредним, паметним композитним структурама.
 - ➔ Испитни поступак и апаратуру могуће је прилагодити и примени на структурама већих димензија, сложенијег геометријског облика, и у условима изван лабораторије, нпр. при спровођењу теренских мерења.
 - ➔ Поред примене у ваздухопловној индустрији, на композитним елементима летелица и ветротурбина, могуће је испитати даљу примену и у аутомобилској индустрији, турбомашинама, цевоводима, грађевинарству, како на композитним тако и на металним и осталим материјалима.
 - ➔ У складу са порастом тренда коришћења ветроенергетских система, њихово одржавање и санација постају отежани. Подаци које добијамо структуралним праћењем, значајни су у скраћењу времена потребног при инспекцији компоненти ветротурбина и превенцији појаве и ширења оштећења. Подаци које је могуће сакупити предложеним испитним поступком (експерименталним и нумеричким) на појединачним компонентама могуће је даље користити за управљање делом или целим системом (нпр. у оквиру ветрофарме).
 - ➔ Експериментални поступак приказан у оквиру доктората може се користити и за валидацију нумеричких модела структуре, нарочито у области отказа композитних материјала. Опет, применљив је и при анализи карактеристика самог материјала али и при анализи карактеристика/понашања читаве структуре.
 - ➔ Коначно, DIC метод и апаратура налази примену и при анализи принудних осцилација и анализе структуре што се среће код ротирајућих хеликоптерских лопатица или турбомашина.

Литература

- [1] Jimin He, Zhi-Fang Fu, (2001). *Modal Analysis*, Butterwoth-Heinemann, Oxford
- [2] Geradin M., Rixen D., (1994). *Mechanical Vibrations, Theory and Application to Structural Dynamics*, University of Lerge, Belgium, Technische Universitat, Germany ISBN 978-1-118-90020
- [3] D. J. Ewins Professor of Vibration Engineering Imperial College of Science, Technology and Medicine London, England, "Modal Analysis "Modal Testing: Theory, Practice and Application", 2000.
- [4] Guillaume P., (2005) *Modal analysis*, Department of Mechanical Engineering, Vrije Universiteit Brussel, Belgium
- [5] Вуковић Ј., Обрадовић А., *Линеарне осцилације механичких система*, Машински факултет, Београд (2007)
- [6] Stevens, K.K. 1985; Modal analysis-an old procedure with a new look. *Mechanical Engineering* 52-5
- [7] Thomson W., Dahleh Dillon M., (1998). *Theory of vibration with applications*, Simon and Schuster/A Viacom Company, New Jersey
- [8] Craig R., (1981), *Structural dynamics*, John Willey & Sons, Inc.
- [9] Krstić. H., Sigmund V., (2008). Utvrđivanje lokacije oštećenja na konstrukciji dinamičkim mjerenjem, *Technical Gazzete*, vol.15, no. 1, ISSN 1330-3651, UDC/UDK 624.042:624.92
- [10] Lengvarsky P., Bocko J., (2013) *Theoretical Basis of Modal Analysis*, *American Journal of Mechanical Engineering*, vol. 1, no. 7, p. 173-179, DOI:10.12691/ajme-1-7-4
- [11] Wenliang Z., Chelidze D., (2008). Generalized Eigenvalue Decomposition in Time Domain Modal Parameter Identification, *Journal of Vibration and Acoustics*, vol.130, no.011001, DOI: 10.1115/1.2775509
- [12] Marin J., Barosso A., Paris F (2008), Study of damage and repair of blades of a 300 kW wind turbine, *Energy* 33(2008) 1068-1083
- [13] Wolff T., Richardson M., (1989), *Fault Detection in structures from changes in their modal parameters*, San Jose, California

- [14] Ganeriwala S., Yang J (2011). Using Modal Analysis for Detecting Cracks in Wind Turbine Blades, *Vibrant Technology*, Scott Valley, California
- [15] Li Leihong., Structural design of composite rotor blades with consideration of manufacturability, durability and manufacturing uncertainties, *doktorska disertacija*, Georgia Institute of Technology(2008)
- [16] Larwood M.S, Dynamic Analysis Tool Development for Advanced Geometry Wind Turbine Blades, *doktorska disertacija*, Stanford University, California(2009)
- [17] Grbović A., Istraživanje zamornog veka nosećih strukturalnih elemenata izrađenih od super legura, *doktorska disertacija*, Mašinski fakultet, Beograd(2012)
- [18] Станојевић Марија, Нумеричко и емпиријско испитивање фреквентних карактеристика композитних танкозидих структура, *Mašinski fakultet* Beograd 2010
- [19] Allemang, R.J 1984: Experimental Modal Analysis. *Proceeding of the 2nd International Modal Analysis Conference*; Orlando; Florida, 1085-1097
- [20] Stupar S., Petrović Z., Kostić I., Petrašinović D., Simonović A., Komarov D., Peković O., Grbović A., (2007), Iveštaj o ispitivanju veze segment-ramenjača lopatice glavnog rotora helikoptera Mi-8, *Mašinski fakultet*
- [21] Allemang R., Brown D..(1982), A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis, *Proceedings of the 1st International Modal Analysis Conference*, pp.110-116
- [22] Pedersen H., Kristensen O(2003), *Applied Modal Analysis of Wind Turbine Blades*, Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark
- [23] Larsen G., Hansen M. (2002), *Modal Analysis of Wind Turbine Blades*, Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark
- [24] Kong C., Bang J.(2005), Structural investigation of composite wind turbine blade considering various load cases and fatigue life, *Energy* 30(2005) 2101-2114
- [25] Česnik M., Slavič J., Boltežar M. (2016). Assessment of the Fatigue Parameters from Random Vibration Testing: Application to a Rivet joint, *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, vol.62., no. 7-8., p.471-482, DOI:10.5545/sv-jme.2016.3774
- [26] Craig R., (1987), A review of time-domain and frequency-domain component-mode synthesis methods, *International Journal of Analytical and experimental Modal Analysis*, 2(2):59-72

- [27] Epaarachchi J., Clausen P., Accelerated Full Scale fatigue Testing Of A Small Composite Wind Turbine Blade Using A Mechanically Operated Test Rig, *Structural Integrity and Fracture*, 00000836(2004)
- [28] Mitrović N., Balać M., Petrović A., Milošević M. (2017). *Primena metode korelacije digitalnih slika (digital image correlation-DIC) na opremu pod pritiskom*, Monografija, Mašinski Fakultet Univerziteta u Beogradu
- [29] GOM mbh, (2008). PONTOS/ARAMIS HighSpeed PHOTRON SA1 User Information, D-38106 Braunschweig, Germany
- [30] GOM mbh, (2013). *ARAMIS v6.3 and higher User Manual-Software*, D-38106 Braunschweig, Germany
- [31] Peters H., Ranson F., Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis, *Optical Engineering*, vol 21,427, (1981)
- [32] Sutton A., McNeill R., Helm D., Chao J, Advances in Two-Dimensional and Three-Dimensional Computer Vision, *Photomechanics*, vol.77,323-372,(2000)
- [33] Митровић Н.(2013), *Напони и деформације структура комплексне геометрије цефоводне арматуре*, докторска дисертација, Машински факултет, Београд
- [34] Hild F., Roux S., (2012). Comparison of local and global approaches to digital image correlation, *Experimental Mechanics*, vol.52, no. 9 p. 1503-1519, DOI: 10.1007/s11340-012-9603-7
- [35] Fathi A., Keller J., Altstaedt V. (2015). Full-field shear analyses of sandwich core materials using Digital Image Correlation (DIC), *Composites: Part B*, vol.70 p.156-166
- [36] Wang D., Mottershead J., (2016). Measurement Precision and Spatial Resolution with Kriging Digital Image Correlation, *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, vol. 62, no.7-8., p. 419-429, DOI:10.5545/sv-jme.2016.3736
- [37] Tarigopula V., Hopperstad O.S., Langseth M., Clausen A.H., Hild F. (2008). A study of localization in dual – phase high – strength steels under dynamic loading using digital image correlation and FE analysis, *International Journal of Solids and Structures* vol.45, p. 601–619, Cornell University library
- [38] Abanto-Bueno J., Lambros J, Investigation of crack growth in functionally graded materials using digital image correlation, *Engineering Fracture Mechanics*, vol69, 1695-1711 (2002)

- [39] Caminero M.A., Lopez-Pedrosa, Pinna C., Soutis C. (2013). Damage monitoring and analysis of composite laminates with an open hole and adhesively bonded repairs using digital image correlation, *Composites: Part B*, vol.53 p.76-91
- [40] Abdulhamid H., Bouvet C., Michel L. (2016). Experimental study of compression after impact of asymmetrically tapered composite laminate, *Composite Structures* vol.149 p.292-303
- [41] Karthikeyan K. Russell B., Fleck N., Masta M., Wadley H., The soft impact response of composite laminate beams, *International Journal of Impact Engineering* 60 (2013) 24-36
- [42] Katunin A., Dragan K., Dziendzikowski M, Damage identification in aircraft composite structures: A case study using various non-destructive testing techniques, *Composite Structures* 127(2015) 1-9
- [43] Avachat S., Zhou M. (2015). High-speed digital imaging and computational modeling of dynamic failure in composite structures subjected to underwater impulsive loads, *International Journal of Impact Engineering* vol.77, p. 147-165
- [44] Goidescu C., Weleman H., Garnier C., Damage investigation in CFRP composites using full-field measurement techniques: Combination of digital image stereo-correlation, infrared thermography and X-ray tomography, *Composites:Part B* 48 (2013) 95-105
- [45] Ahmad M., Hoa S., Flexural stiffness of thick walled composite tubes, *Composite Structures* 149(2016) 125-133
- [46] Tiwari V., Sutton M., McNeill S., Xu S., Application of 3D image correlation for full-field transient plate deformation measurements during blast loading, *International Journal of Impact Engineering* 36 (2009) 862-874
- [47] Gerbig D., Bower A., Savic V., Coupling digital image correlation and finite element analysis to determine constitutive parameters in enckling tensile specimens, *Solids and structures* DOI: 10.1016/ijsoistr.2016. 06.038, (2016)
- [48] Haldar S., Caputo D., Buesking K., Bruck H., Flexural behavior of singly curved X-Cor sandwich composite structures: Experiment and finite element modeling, *Composite Structures*, 129(2015) 70-79
- [49] Zhou H., Dou H., Qin L. Chen Y., A review of full-scale structural testing of wind turbine blades, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 33 (2014) 177-187

- [50] Wang X., Ahn J., Kaboglu C., Yu L., Blackman B, Characterisation of composite-titanium alloy hybrid joints using digital image correlation, *Composite Structures* 140 (2016) 702-711
- [51] Lubin G., *Handbook of composites*, Van Nostrand Reinhold, New York(1982)
- [52] Vasiliev V. & Morozov E., *Mechanics and Analysis of Composite Materials*, Elsevier Science, Oxford,UK(2002)
- [53] Reddy JN. *Mechanics of Composite Materials: Selected Works of Nicholas J. Pagano*, Springer, USA (1994)
- [54] Jones Robert M. *Mechanics of Composite Materials 2nd Ed.*, Taylor-Francis, Philadelphia, USA (1999).
- [55] Elices M., Llorca J., *Fiber fracture*, Elsevier Science, Oxford,UK(2002)
- [56] Fox B.L., *The Manufacture, Characterization and Aging of Novel High Temperature Carbon Fibre Composites*, *doktorska disertacija*, The Australian National University Australia(2001)
- [57] Niu.X., *Process induced residual stresses and dimensional distortions in advanced laminated composites*, *doktorska disertacija*, University of Florida(1999)
- [58] Kant T, Swaminathan K, Free vibration of isotropic orthotropic and multilayer plates based on higher order refined theories, *J Sound Vib*,241 (2001) 319–27.
- [59] Srinivas S., Bending, Vibration And Buckling Of Simply Supported Thick Orthotropic Rectangular Plates And Laminates, *International Journal of Solids and Structure*, 6 (1970) 1463–1481.
- [60] Nosier A., Kapania R.K., Reddy J.N. Free vibration analysis of laminated plates using a layerwise theory, *AIAA Journal*, 31 (12) (1993) 2335-2346
- [61] Yu W., Liao L., Hodges D.(2005), Theory of initially twisted, composite. Thin-walled beams, *Thin-Walled Structures* 43 (2005) 1296-1311
- [62] Reddy JN. *Mechanics of laminated composite plates and shells theory and analysis 2nd Ed.*, CRC Press, New York, USA (2004).
- [63] Shorkriek M., Rafiee R.(2006), Simulation of fatigue failure in a full composite wind turbine blade, *Composite Structures*, 74(2006) 332-342
- [64] Jensen F., Falzon B., Ankersen J(2006)., Structural testing and numerical simulation of a 34 m composite wind turbine blade, *Composite Structures* ,76(2006) 52-61

- [65]Kensche C(2006), Fatigue of composites for wind turbines, *International Journal of Fatigue* 28(2006) 1363-1374
- [66]Argyris J. H., Kelsey S. Structural Analysis by the Matrix Force Method with Applications to Aircraft Wings. *Wiss. Ges. Luftfahrt. Jahrb.*, 1956.
- [67]Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. *The Finite Element Method 6th Ed.*, Elsevier, USA 2005.
- [68]Секуловић М. *Метод коначних елемената*, Грађевинска књига, Београд,1988
- [69] Hughes T.J.R. *The Finite Element Method – Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*, Prentice-Hall, USA 1987
- [70] Ferreira A.J.M. *MATLAB Codes for Finite Element Analysis*, Springer, 2008
- [71] Barbero E.J. *Finite Element Analysis of Composite Materials*, CRC, USA, 2008
- [72]Ochoa O.O., Reddy J.N. *Finite Element Analysis of Composite Laminates*, Kluwer Academic Publishers, 1992
- [73]Peković O., Izogeometrijska analiza laminiranih kompozitnih struktura, *doktorska disertacija*, Mašinski fakultet, Beograd(2014)
- [74]Peković O., Stupar S., Simonović A., Svorcan J., Trivković S. (2015). Free vibration and buckling analysis of higher order laminated composite plates using the isogeometric approach, *Journal of theoretical and applied mechanics*, vol 53., no 2., p. 453-466, DOI: 10.15632/jtam-pl.53.2.453
- [75]Shojaee S., Izadpanah E., Valizadeh N., Kiendl J. (2012). Free vibration analysis of thin plates by using a NURBS-based isogeometric approach, *Finite Elements in Analysis and Design*, vol 61., p.23-34
- [76]E. Carrera, Theories and Finite Elements for Multilayered, Anisotropic, Composite Plates and Shells, *Arch. Comput. Meth. Engng.*, 9 (2) (2002) 87-140.
- [77]Zhang YX, Yang CH. Recent developments in finite element analysis for laminated composite plates. *Compos. Struct*, 88 (2009)147–157.
- [78]Akhras G, Cheung MS, Li W. Static and vibrations analysis of anisotropic laminated plates by finite strip method, *International Journal of Solids and Structures*, 30(22) (1993) 3129–3137.
- [79]Guo Y., Nagy A.P., Gürdal Z . A layerwise theory for laminated composites in the framework of isogeometric analysis, *Composite Structures*, 107 (2014) 447–457
- [80]Живковић И., Максимовић С., Алексић Р(2004), *Нумеричка и експериментална*

анализа иницијалног отказа композитних ламината са уграђеним
фибероптичким сензорима, Интегритет и век конструкција, вол.4,
бр.3,стр.137-148

- [81]Peeters J., Vandepitte D., Sas P.(2006), *Structural analysis of a wind turbine and its drive train using the flexible multibody simulation technique*, Proceedings of ISMA,Belgium
- [82]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)
- [83]Maalawi K., Negm H.(2002), Optimal frequency design of wind turbine blades(2002), *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90 (2002) 961-986
- [84]Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, D 3039-D 3039M-00
- [85]Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials, D 7264/D 7264M-15
- [86]Pickerd V., *Optimization and Validation of the ARAMIS Digital Image Correlation System for use in Large-scale High Strain-rate Events*, Defence Science and Technology Organization, Australia(2013)
- [87]Naresh K., Shankar K., Rao B.,Velmurugan R., Effect of high strain rate on glass/carbon-hybrid fiber reinforced epoxy laminated composites, *Composites Part B* 100 (2016) 125-135
- [88] He T., Liu L., Makeev A., Shonkwiller B., Characterization of stress-strain behavior of composites using digital image correlation and finite element analysis, *Composite Structures*, 140 (2016) 84-93
- [89]Chinn T., (2013). Strain Measurement Validation Using 3D Photogrammetry Techniques, San Jose State University, *Master's Theses and Graduate Research Paper 4263*
- [90]Wattrisse B. Chrysochoos A., Analysis of strain localization during tensile test by digital image correlation, *Experimental Mechanics*,vol.41.n.1, p.29-39(2001)
- [91] Sutton M., Wolters J., Peters H., Determination of Displacement Using an Improved Digital Correlation Method, *Computer Vision*1(3):133-139(1983)
- [92] Yang L., Smith L., Gothecker A., Chen X., Measure Strain Distribution Using Digital

- Image Correlation(DIC) for Tensile Tests, The Advanced High Strength Steel Team, Southfield(2010)
- [93]Madabhusi-Raman P., Davalos J.F. Static shear correction factor for laminated rectangular beams, *Composites Part B*, 27(3-4) (1996) 285–293
- [94]Adams D. White J., Rumsay M., Farrar C of Structural Materials and Components (Methods with Applications), John Wiley & Sons, Hoboken
- [95]Boller C., *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, John Willey & Sons, England(2009)
- [96]Adams D., *Health Monitoring of Structural Materials and Components(Method and Applications)*, John Willey & Sons, England(2007)
- [97]Staszewski W., Boller C., Tomlinson G., *Health Monitoring of Aerospace Structures(Smart Sensor Technologies and Signal Processing)*,John Willey & Sons, England(2004)
- [98]Friedmann A., Mayer D., Koch M.(2011), *Monitoring and Damage Detection in Structural Parts of Wind Turbines*, Fraunhofer Institute, Germany
- [99]Giurgiutiu V., *Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors*,proveriti izdavace
- [100] Zorić N., Dinamičko ponašanje pametnih tankozidnih kompozitnih struktura, *doktorska disertacija*, Mašinski fakultet, Beograd(2014)
- [101] Simonovic A., Jovanovic M., Lukic N., Zoric N., Stupar S. (2016). Experimental studies on active vibration control of smart plate using modified PID controller with optimal orientation of piezoelectric actuator, *Journal of Vibration and Control*, vol.22., no.11., p.2619-2631, DOI:10.1177/1077546314549037
- [102] Jovanović M., Simonović A., Zorić N., Lukić N., Stupar S., Ilić S. (2013). Experimental studies on active vibration control of a smart composite beam using a PID controller, *Smart Materials and Structures*, vol.22., no. 11., DOI:10.1088/0964-1726/22/11/115038
- [103] Beal J., Shukla A., Brezhneva O., Optimal sensor placement for enhancing sensitivity to change in stiffness for structural health monitoring, *Optim Eng* (2008) 9: 119-142
- [104] Adams D.,White J., Rumsey M.(2011), Structural health monitoring of wind turbines: method and application to a HAWT, *Wind Energy*, DOI: 10.1002/we.437

- [105] Versteegh C.(2004), *Design of the Zephyros Z72 wind turbine with emphasis on the direct drive PM generator*, GarrardHassan & Partners NL, Sterralaan 7,Hilversum, Norway
- [106] Scalici T., Fiore V., Orlando G., Valenza A., A DIC-based study of flexural behavior of roving/mat/roving pultruded composites *Composite Structures* 131 (2015) 82-89
- [107] Owen R., Inman D., Ha D., A multi-mode structural health monitoring szstem for wind turbine blades and components, *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, (2010)
- [108] Hameed Z. Hong Y., Cho Y., Ahn S., Song C., Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related slgorithms, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 1-39
- [109] Balasko M., Svab E., Molnar G., Veres I.,Classification of defects in honeycomb composite structure of helicopter rotor blades, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 542 (2005) 45-51
- [110] Liu W., Tang B., Jiang Y., Status and problems of wind turbine structural health monitoring techniques in China, *Renewable Energy* 35 (2010) 1414-1418
- [111] Ciang C., Lee J., Bang H., Structural health monitoring for a wind turbine system:a rewiw of damage detection methods, *Measurement Science and Technology*,19(2008) 122001, 20 pp
- [112] Rumsey M., Paquette J., *Structural health monitoring for a wind turbine blades*, Sandia National Laboratories, US(2008)
- [113] Sundaredan M., Schulz M., Ghoshal A., *Structural Health Monitoring Static Test of a Wind Turbine Blade*, National Renewable Energy Laboratory, Colorado(2002)
- [114] Buhl Jr M., Wright A., Pierce(2000), Wind Turbine Design Codes: A Comparison of the Structural Response, *Presented at the 19th American Society of Mechanical Engineers(ASME) Wind Energy Symposium*, Reno, Nevada

Биографија

Мр Марија Балтић (девојачко Станојевић), рођена је 24.02.1980. године у Пожаревцу, где је завршила основну школу и гимназију природно-математичког усмерења. Дипломирала је на Машинском факултету Универзитета у Београду на Одсеку за ваздухопловство 24.11.2004. године са просечном оценом 8,88. и оценом 10 на одбрани дипломског рада. Постдипломске студије уписала је школске 2004/2005. године на Машинском факултету Универзитета у Београду на Катедри за ваздухопловство, где 15.07.2010. године стиче звање магистра техничких наука одбраном магистарског рада под насловом „Нумеричко и емпиријско испитивање фреквентних карактеристика композитних танкозидних структура“, ментор проф. др Слободан Ступар. Од 2005. године запослена је на Машинском факултету и ангажована на пројекту финансираном од стране Министарства за науку и заштиту животне средине ев. бр. ТР-6373 „Развој лаког хеликоптера“, као и иновационом пројекту ев. бр. ИП-8123 „Развој технолошки напредне ветротурбине оптимизирание за мале брзине ветра“ током 2006. и 2007. године. Учествоје у реализацији наставе на предметима Ветротурбине и Ветротурбине 2.

Као истраживач учествовала у реализацији пројекта технолошког развоја финансираног од стране Министарства науке у периоду од 2008. до 2010. године, ев. бр. 18029 под називом „Развој технологија пројектовања и израде лопатица ветротурбина великих снага и других великогабаритних композитних структура“. Од 2010. ангажована је на пројекту ев. бр. 35035 „Истраживање и развој савремених приступа пројектовања композитних лопатица ротора високих перформанси“.

Аутор и коаутор је више од 40 научно-стручних радова. У оквиру сарадње са привредом учествовала је у изради више од 50 студија, елабората и главних машинских пројеката за различита постројења. Кандидат говори енглески језик и поседује искуство у коришћењу инжењерских софтверских пакета, као и експерименталном истраживању. Удата је и има двоје деце.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписана **Марија Балтић**

број индекса

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

УТИЦАЈ ОШТЕЋЕЊА НА ДИНАМИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ КОМПОЗИТНИХ ЛОПАТИЦА РОТОРА ВЕТРОТУРБИНА

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 13. јул 2018.

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора	Марија Балтић
Број индекса	
Студијски програм	Докторске академске студије
Наслов рада	Утицај оштећења на динамичке карактеристика комполитних лопатица ротора ветротурбина
Ментор	проф. др Слободан Ступар
Потписана	Марија Балтић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 13. јул 2018.

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

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

УТИЦАЈ ОШТЕЋЕЊА НА ДИНАМИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ КОМПОЗИТНИХ ЛОПАТИЦА РОТОРА ВЕТРОТУРБИНА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 13. јул 2018.

1. Ауторство - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.