

Dinamička analiza cikličke in-situ kidalice za ispitivanje materijala unutar CT skenera

Stanić, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:488504>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-10**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Luka Stanić

Zagreb, svibanj 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Dinamička analiza cikličke in-situ kidalice za ispitivanje materijala unutar CT skenera

Mentor:

Doc.dr.sc. Zvonimir Tomičević

Dr.sc. Damjan Čakmak

Student:

Luka Stanić

Zagreb, svibanj 2021.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:



Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Luka Stanić** JMBAG: 0035204184

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Dinamička analiza cikličke in-situ kidalice za ispitivanje materijala unutar CT skenera**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Dynamic analysis of the fatigue in-situ loading device for material testing inside a CT scanner**

Opis zadatka:

U odnosu na metale, kompozitni materijali pružaju značajniju izdržljivost ciklički opterećenim inženjerskim konstrukcijama. Do loma kompozita može doći uslijed jednog ili kombinacije različitih mehanizama oštećenja (npr. odvajanje vlakana/matrice, pucanje matrice, delaminacija, lom vlakana i rast poroznosti). Stoga je potrebno primijeniti napredne nerazorne tehnike ispitivanja kao što je računalna tomografija X-zraka (eng. X-Ray Computed Tomography – XCT), s ciljem sveobuhvatne identifikacije mehanizma oštećenja unutar kompozitnih materijala. Kako bi se omogućilo in-situ XCT promatranje oštećenja i loma materijala, potrebno je provesti prilagodbu i integraciju postojećih eksperimentalnih postava. Osim toga, kako bi se istovremeno narinulo cikličko opterećenje i zabilježio 3D sken potrebno je konstruirati odgovarajuću kidalicu kod koje će biti omogućeno potpuno skeniranje promatranog područja interesa ispitnog uzorka tijekom rotacije od 360°.

Kod cikličkih opterećenja javljaju se vibracije samog ispitnog uređaja koje mogu nepovoljno utjecati na progibe rotirajuće platforme XCT skenera te na mikropomake ispitnog uzorka koji mogu degradirati kvalitetu zabilježenog 3D volumena promatrane mikrostrukture kompozita. Iz tog razloga potrebno je minimizirati, ili potpuno eliminirati vibracije ispitnog uređaja koje se prenose na sustav za akviziciju CT skenova.

Tijekom rada potrebno je:

1. Opisati fenomen oštećenja kompozitnih materijala i načine procjene oštećenja.
2. Iz dostupne literature proučiti mehanizme opterećenja i konstrukciju postojećih cikličkih uređaja koji se koriste unutar CT skenera.
3. Opisati način rada razvijene dinamičke kidalice.
4. Na temelju dobivene tehničke dokumentacije izraditi trodimenzijski numerički model (metoda konačnih elemenata) dinamičke kidalice.
5. Korištene konačne elemente i dinamičke modele proračuna verificirati na jednostavnim primjerima koje je moguće provjeriti analitički, ili na primjerima iz literature.
6. Provesti dinamičku analizu kidalice i procijeniti vibracije, tj. amplitude sila prenesene s kidalice na podlogu s obzirom na kružne frekvencije rada dinamičke kidalice.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan: Datum predaje rada: Predviđeni datumi obrane:
4. ožujka 2021. 6. svibnja 2021. 10. – 14. svibnja 2021.

Zadatak zadao: Predsjednik Povjerenstva:
  
Doc.dr.sc. Zvonimir Tomičević Dr.sc. Damjan Čakmak Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Ovaj rad izrađen je u sklopu projekta "Promatranje, identifikacija i kvantifikacija mehanizama mehaničkog oštećenja na kompozitima ojačanim staklenim vlaknima primjenom različitih metoda nerazornog ispitivanja" (UIP-2019-04-5460,Z. Tomičević).

Zahvaljujem se svojim mentorima doc. dr. sc. Zvonimiru Tomičeviću i dr. sc. Damjanu Čakmaku na ukazanom povjerenju, strpljenju i poticajima tijekom izrade ovoga rada.

Također, zahvaljujem se asistentima Andriji Zaplatiću i Ani Vrgoč na ugodnom druženju tijekom izrade rada, na ustupanju računala za provedbu simulacija i na gomili o(bez)hrabrujućih komentara prilikom ispravljanja.

Veliko hvala i mojim roditeljima Dubravki i Marinku na pruženoj ljubavi i podršci tijekom studija. Hvala i sestri Andrei i braći Ivanu i Mateju što su uvijek bili uz mene.

Zahvaljujem se i svojoj zaručnici Romani na ljubavi, strpljenju, motiviranju i podršci.

Zahvaljujem se najboljem prijatelju Marinu na pomoći i druženju tijekom studija, hvala i lutkanima i svim prijateljima ministrantima.

Hvala i teti Ani i striki Ivici na podršci tijekom studija.

Posebna zahvala ide prijatelju Nikoli na izdvojenom vremenu i pomoći pri pisanju u latex-u.

Najveća hvala ide svemogućem Bogu na svim darovanim talentima i vještinama i na svim ljudima koje sam upoznao tijekom studija.

Luka Stanić

SADRŽAJ

Popis slika	III
Popis tablica	V
Popis oznaka	VI
Sažetak	VIII
Summary	IX
1. Uvod	1
1.1. Motivacija	1
1.2. Struktura rada	2
2. Kompozitni materijali	3
2.1. Kompoziti ojačani vlaknima	3
2.2. Oštećenja kompozitnih materijala	4
2.2.1. Pucanje matrice i odvajanje matrice i vlakna	5
2.2.2. Delaminacija	5
2.2.3. Lom vlakna	6
2.3. Način procjene oštećenja	6
3. Računalna tomografija	9
3.1. Princip računalne tomografije	9
3.1.1. Tipovi laboratorijskih XCT skenera	10
3.2. Mehanička ispitivanja	12
3.2.1. Ex-situ ispitivanja	12
3.2.2. In-situ ispitivanja	13
4. In-situ ciklička kidalica	14
4.1. Pregled postojećih in-situ cikličkih kidalica	14
4.1.1. Ciklička kidalica 1	14
4.1.2. Ciklička kidalica 2	15

4.2. Princip rada razvijene cikličke kidalice	16
5. Numerička analiza cikličke kidalice	20
5.1. Metoda konačnih elemenata	20
5.2. Korišteni konačni elementi	21
5.3. Metoda modalne analize	23
5.4. Model prigušenja	24
5.4.1. Rayleigh-evo prigušenje	24
5.5. Implicitna numerička metoda	25
5.6. Korištene kinematske veze	27
5.6.1. <i>Distributing coupling</i>	27
5.6.2. <i>Hinge</i>	27
5.6.3. <i>Translator</i>	28
5.6.4. <i>Tie</i>	29
5.7. Verifikacija modela	29
5.8. Numerički model kidalice	34
5.9. Frekvencijska analiza cikličke kidalice	39
5.10. Dinamička analiza kidalice	43
6. Zaključak	48
Literatura	50

POPIS SLIKA

2.1. Raspodjela vlakana: a) kontinuirano jednosmjerno usmjerena b) diskontinuirano nasumično usmjerena c) ortogonalno raspoređena d) višesmjerno usmjerena [4] . . .	4
2.2. Odvajanje vlakna od matrice i nastanak poprečne pukotine [7]	5
2.3. Odvajanje slojeva [7]	6
2.4. Lom vlakna [7]	6
3.1. Shematski prikaz: a) 2D CT uređaja i b) 3D CT uređaja [10]	10
3.2. Prikaz ovisnosti rezolucije o rasponu mjerenja za industrijske CT skenere [10] . . .	11
3.3. Približavanje uzorka izvoru zračenja [10]	12
3.4. Primjer ex-situ ispitivanja [12]	13
3.5. Primjer in-situ ispitivanja [12]	13
4.1. Ciklička kidalica 1 [13]	14
4.2. Ciklička kidalica 2 [14]	16
4.3. 3D prikaz cikličke kidalice	17
4.4. Bočni presjeci kidalice	18
4.5. Vratilo	19
5.1. Shematski prikaz rada programskog paketa <i>Abaqus</i> [15]	21
5.2. Tetraedarski element drugog reda C3D10 [16]	22
5.3. Heksaedarski element drugog reda C3D20 [16]	22
5.4. Ovisnost Rayleigh-evog prigušenja o frekvenciji [18]	25
5.5. <i>Join</i> veza [19]	27
5.6. <i>Revolute</i> veza [19]	28
5.7. <i>Hinge</i> veza [19]	28
5.8. <i>Slot</i> veza [19]	28
5.9. <i>Translator</i> veza [19]	29
5.10. Zona tolerancije <i>Tie</i> veze [19]	29
5.11. Verifikacijski model	30
5.12. Verifikacijski model u <i>Abaqus</i> -u	32
5.13. Mreža s: a) 2 heksaedarska i b) 24 tetraedarska konačna elementa	33
5.14. Ovisnost amplitude pomaka o vremenu	34

5.15. Pojednostavljeni model kidalice	35
5.16. Prikaz pojednostavljenih dijelova kidalice	36
5.17. Kontakt između ekscentra i kućišta	38
5.18. Rubni uvjet uklještenja	39
5.19. Mreža s a) 19078 i b) 42728 konačnih elemenata	40
5.20. Konvergencija rješenja pete vlastite frekvencije	40
5.21. Glavne forme vibriranja dinamičke kidalice: a) prva i druga, b) treća, c) četvrta, d) peta	42
5.22. Rubni uvjet kutne brzine	43
5.23. Pomaci ispitnog uzorka u: a) donjoj mrtvoj točki i b) gornjoj mrtvoj točki	44
5.24. Ovisnost reaktivne sile RF2 u ovisnosti o vremenu za frekvenciju uzbude od 78,181 Hz	45
5.25. Promjena reaktivne sile RF1 ovisno o frekvenciji uzbude f	46
5.26. Promjena reaktivne sile RF2 ovisno o frekvenciji uzbude f	46

POPIS TABLICA

2.1. Podjela nerazornih ispitivanja [8]	7
4.1. Nomenklatura pojedinih dijelova kidalice	18
5.1. Parametri Rayleigh-evog prigušenja	32
5.2. Iznos amplitude pomaka u rezonanciji	33
5.3. Nomenklatura pojedinih dijelova pojednostavljenog modela	37
5.4. Mehanička svojstva materijala	38
5.5. Vlastite frekvencije kidalice	41

POPIS OZNAKA

Popis latinskih oznaka

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
A	m^2	Površina poprečnog presjeka
C	Ns/m	Matrica prigušenja
c	Ns/m	Koeficijent prigušenja
c_{kr}	Ns/m	Kritična vrijednost koeficijenta prigušenja
E	N/m^2	Modul elastičnosti
$F(t)$	N	Periodična sila
F^e	N	Vektor vanjskih sila
F^i	N	Vektor unutarnjih sila
F^r	N	Vektor razlike unutarnjih i vanjskih sila
\hat{F}	N	Amplituda pomaka
f_n	Hz	Vlastita frekvencija
K	N/m	Matrica krutosti
k	N/m	Koeficijent krutosti
l	m	Duljina
m	kg	Masa
M	kg	Matrica masa
R	N	Vektor sila
RF1, RF2, RF3	N	Reaktivna sila u smjeru osi x, y i z
t	s	Vrijeme
u_x, u_y, u_z	m	Pomaci u smjeru osi x, y i z
V	m	Vektor pomaka
\dot{V}	m/s	Vektor brzina
\ddot{V}	m/s^2	Vektor ubrzanja
\bar{V}	m	Amplituda pomaka
VR3	rad/s	Kutna brzina oko osi z
x	m	Pomak
\dot{x}	m/s	Brzina
\ddot{x}	m/s^2	Ubrzanje
\hat{x}	m	Amplituda pomaka

Popis grčkih oznaka

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
α	rad/s	Koeficijent Rayleigh-ovog prigušenja
β	s/rad	Koeficijent Rayleigh-ovog prigušenja
ζ	[-]	Bezdimenzijski koeficijent prigušenja
Ω	rad/s	Kružna frekvencija vanjske uzbuđe
ω_n	rad/s	Vlastita kružna frekvencija

SAŽETAK

Kompoziti ojačani vlaknima, zbog mogućnosti modifikacije mehaničkih svojstava, preuzimaju ulogu konvencionalnih materijala te svoju primjenu pronalaze ponajprije u zrakoplovstvu i automobilskoj industriji. Mehanička svojstva kompozita ovise ponajviše o heterogenoj strukturi, raspodjeli i udjelu konstituenata, između kojih se mogu pojaviti različiti mehanizmi oštećenja. Za određivanje mehaničkih svojstava navedenih materijala potrebno je koristiti napredne metode ispitivanja koje pružaju uvid u fenomene koji se javljaju unutar ispitnog uzorka tijekom opterećivanja. Računalna tomografija (eng. *Computed Tomography-CT*) omogućuje trodimenzijski prikaz vanjskog i unutarnjeg stanja skeniranog objekta bez da ga ošteti. Mehanička ispitivanja mogu se provoditi ex-situ ili in-situ unutar CT skenera. Prilikom ex-situ ispitivanja opterećivanje uzorka provodi se izvan CT skenera te se potom uzorak skenira u rasterećenom stanju. Međutim, kod in-situ ispitivanja, uzorak se istovremeno opterećuje i skenira. Iako in-situ ispitivanja daju potpuni uvid u promjene unutar uzorka u odnosu na ex-situ ispitivanja, njihovo provođenje je kompleksnije i zahtjeva uporabu specifičnih ispitnih uređaja koji stanu unutar CT skenera.

Iz tog je razloga razvijena in-situ ciklička kidalica za potrebe projekta FULLINSPECT, koji se bavi promatranjem inicijacije i propagacije pukotina te identifikacijom mehanizama loma unutar kompozita ojačanim vlaknima uslijed cikličkih opterećenja. Prilikom rada takve kidalice javljaju se vibracije koje mogu oštetiti rotacijski stol CT skener ili utjecati na kvalitetu zabilježenih 3D slika. Stoga je u ovom radu izrađen pojednostavljeni model kidalice te je proučavan najkonzervativniji slučaj opterećivanja pri maksimalnoj amplitudi pomaka ispitnog uzorka od 1 mm. Primjenom metode konačnih elemenata određene su glavne forme vibriranja kidalice i izračunate su sile koje djeluju na rotacijski stol tomografa u frekvencijskom rasponu od 0 do 100 Hz.

Ključne riječi: vlaknima ojačani kompoziti, oštećenja kompozitnih materijala, računalna tomografija, in-situ ciklička kidalica, metoda konačnih elemenata, modalna analiza, Rayleigh-evo priгуšenje, dinamička analiza.

SUMMARY

Fiber-reinforced composites, due to possibility of modifying the mechanical properties, take on the role of conventional materials and find their application primarily in the aviation and automotive industries. The mechanical properties of composites depend mainly on the heterogeneous structure, distribution and fraction of constituents, between which various damages can occur. To determine the mechanical properties, it is necessary to use advanced test methods that provide insight into the phenomena that occur within the test specimen during loading. Computed Tomography (CT) allows a three-dimensional view of the external and internal state of a scanned object without damaging it. Mechanical tests can be performed ex-situ or in-situ inside the CT scanner. In ex-situ testing, the sample is loaded outside the CT scanner and then the sample is scanned in the unloaded state. However, in in-situ testing, the sample is loaded and scanned at the same time. Although in-situ tests provide a more complete insight into changes within the sample compared to ex-situ tests, their implementation is more complex and requires the use of specific test devices that fit inside the CT scanner.

For this reason, developed in-situ cyclic fatigue machine for the project FULLINSPECT, which deals with the observation of the initiation and propagation of cracks, and identification of mechanisms of fracture within the fiber-reinforced composites during cyclic loading. During the operation of such a fatigue machine, vibrations occur which can damage the rotary table of CT scanner or affect the quality of recorded 3D images. Hence, in this thesis, a simplified model of the fatigue machine was developed and the most conservative case of loading at the maximum displacement amplitude of the test specimen of 1 mm was studied. Using the finite element method, the main vibration shapes were determined and the forces acting on the rotary table of the tomograph in the frequency range from 0 to 100 Hz were calculated.

Keywords: fiber reinforced composites, damage of composite materials, computed tomography, in-situ fatigue machine, finite element method, modal analysis, Rayleigh damping, dynamic analysis.

1. Uvod

Ubrzani razvoj novih proizvoda u područjima poput zrakoplovne i automobilske industrije uvjetuje sve strože zahtjeve na izdržljivost inženjerskih konstrukcija. Uz visoku izdržljivost, raste i potražnja za laganijim konstrukcijama. Iz toga se javlja potreba za razvojem novih i naprednih materijala koji ispunjavaju te zahtjeve. Kompozitni materijali ističu se kao prikladna zamjena za konvencionalne inženjerske materijale zbog visokog omjera čvrstoće i mase. Osim toga, heterogena struktura kompozitnih materijala omogućuje jednostavno modificiranje njihovih svojstava što povećava njihovu primjenu u industriji. Svojstva kompozita, njihovo ponašanje i mehanizmi oštećenja koji se javljaju u njima predmet su brojnih istraživanja [1],[2]. Jednoosnim i višeosnim eksperimentalnim ispitivanjima moguće je odrediti globalni odziv kompozitnih materijala, ali nije moguće dobiti lokalna svojstva konstituenata. Nerazorne metode ispitivanja, poput računalne tomografije (eng. *Computed Tomography-CT*), pružaju uvid u ponašanje i procjenu oštećenja kompozita. Primjenom računalne tomografije moguće je dobiti trodimenzijski prikaz vanjskog i unutarnjeg stanja skeniranog objekta bez da ga se ošteti. Time je omogućena precizna detekcija i propagacija pukotina, identifikacija neželjenih uključina i poroznosti u materijalu. Nedostatak nerazornih metoda je njihova kompleksnost i zahtjev za prilagodbom eksperimentalnog postava za provedbu mehaničkih ispitivanja. In-situ ispitivanja, za razliku od ex-situ ispitivanja, mogu bolje identificirati i pratiti razvoj pukotina jer kod njih nije potrebno rasterećivati uzorak. Međutim, in-situ ispitivanja provode se unutar CT skenera te se u tu svrhu razvijaju novi ispitni uređaji koji omogućuju skeniranje uzoraka tijekom cijelog procesa ispitivanja.

1.1. Motivacija

Kompoziti ojačani vlaknima sve više nalaze primjenu u zrakoplovnoj, automobilskoj i drugim industrijama. Nepoznavanje njihovih cjelokupnih svojstava i načina na koji dolazi do razvoja oštećenja i loma sprječava iskorištavanje njihovog punog potencijala. Da bi se iskoristio njihov potencijal potrebno je provesti niz istraživanja. Jedno od takvih istraživanja je i istraživački projekt FULLINSPECT unutar kojeg je izrađen ovaj diplomski rad. Projekt se bavi karakterizacijom kompozita ojačanih vlaknima i proučavanjem mehanizama loma koji se javljaju u mikrostrukturi kompozita tijekom cikličkih opterećivanja. Iz tog razloga, u sklopu projekta, razvijena je ciklička in-situ kidalica predviđena za rad unutar CT skenera. Prilikom cikličkih opterećenja javljaju se vibracije kidalice koje mogu oštetiti CT skener u kojem se kidalica nalazi ili utjecati na točnost

rezultata ispitivanja. Stoga, cilj diplomskog rada je procijeniti utjecaj vibracija na okolinu primjenom metode konačnih elemenata. U tu svrhu izrađen je pojednostavljeni model cikličke kidalice prilagođen za dinamičku analizu u kojoj su analizirane vlastite vrijednosti kidalice i sile koje djeluju na rotacijski stol tomografa.

1.2. Struktura rada

Diplomski rad podjeljen je u 6 poglavlja. U prvom poglavlju dan je kratak uvod u problematiku, u sljedećem poglavlju opisani su kompozitni materijali ojačani vlaknima, njihovi konstituenti i utjecaj konstituenata na mehanička svojstva kompozita. Uslijed heterogenosti kompozitnih materijala može se javiti više mehanizama oštećenja koja su objašnjena u ovom poglavlju. Također, prikazane su pojedine vrste nerazornih metoda ispitivanja te su dane njihove prednosti i nedostaci.

Nakon opisa pojedinih metoda nerazornih ispitivanja, u trećem poglavlju dan je opis metode računalne tomografije i objašnjen je princip na kojem funkcionira te je prikazana podjela XCT skenera. Opisane su vrste mehaničkih ispitivanja te su navedene prednosti i nedostaci.

Potom su, u četvrtom poglavlju, navedene cikličke kidalice, pronađene u literaturi, koje su se koristile za in-situ mehanička ispitivanja i opisan je njihov način rada. Nadalje, opisana je ciklička kidalica proračunata u ovom radu. Navedene su neke posebnosti kidalice i princip rada.

U narednom, petom poglavlju, opisana je metoda konačnih elemenata i korišteni konačni elementi s kojima je proveden proračun. Budući da je korištena modalna analiza te implicitna metoda dana je njihova teoretska podloga. Prikazan je opis i verifikacija modela prigušenja na jednostavnom primjeru. Opisan je pojednostavljeni model kidalice i kinematske veze koje su korištene za spajanje dijelova, postavljanje numeričke simulacije te dobiveni rezultati.

Na kraju rada dan je kratak pregled obrađenih tema te su izneseni zaključci i dani prijedlozi za daljnje analize.

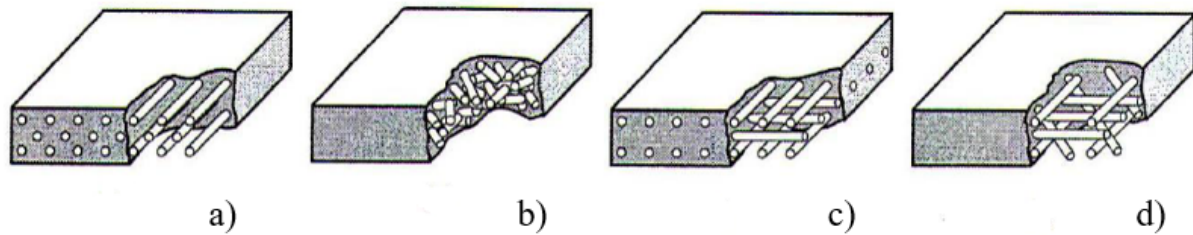
2. Kompozitni materijali

Kompoziti su materijali koji su sastavljeni od dvaju ili više konstituenata s različitim kemijskim i fizičkim svojstvima. Svojstva novog materijala bitno se razlikuju od svojstava individualnih komponenata. Osnovni konstituenti kompozitnih materijala su vlakno i matrica. Primarna zadaća vlakna je preuzimanje opterećenja, tj. vlakna daju čvrstoću kompozitu. Matrica služi za međusobno povezivanje vlakana, prenošenje opterećenja na vlakna, daje vanjsku formu kompozitu, definira njegovo ponašanje obzirom na djelovanje atmosfere itd. Vlakna su najčešće: ugljična, staklena, aramidna i metalna, a njihov volumni udio u kompozitu najčešće iznosi 60-70%. Vlakna mogu biti duga, kratka i prepletena. Matrice mogu biti polimerne (duromeri i plastomeri), ugljične, metalne, keramičke itd. U slučaju izloženosti kompozita utjecajima okoline, matrica je prva izložena smanjenju mehaničkih svojstava te njena svojstva značajno utječu na ponašanje kompozita. Mehanička svojstva kompozita mijenjaju se ovisno o usmjerenosti vlakana. Bolja mehanička svojstva imaju u smjeru vlakna, a niža u smjeru okomitom na vlakna. Kompozitni materijali, zbog svojih jedinstvenih svojstava, imaju široku primjenu. Inženjerske komponente napravljene od kompozita često imaju dulji vijek trajanja od klasičnih materijala, zahtjevaju manje održavanja te zbog toga nalaze sve širu primjenu. Kombinacija visoke čvrstoće, relativno male mase u usporedbi s klasičnim materijalima kao i kemijska postojanost dovele su do upotrebe kompozita u gotovo svim granama industrije (zrakoplovstvu, autoindustriji, medicini, sportu, građevini) [3].

2.1. Kompoziti ojačani vlaknima

Kompoziti ojačani vlaknima (eng. *Fiber reinforced polymers-FRP*) sastavljeni su od polimerne smole kao matrice i vlaknima kao komponentnom za ojačavanje. Vlakna se prema obliku mogu podijeliti na kontinuirana i diskontinuirana, a podjela prema orijentaciji, prikazana Slikom 2.1, je sljedeća [4]:

- a) kontinuirana jednosmjerno usmjerena,
- b) diskontinuirana nasumično usmjerena,
- c) ortogonalno raspoređena vlakna,
- d) višesmjerno usmjerena vlakna.



Slika 2.1: Raspodjela vlakana: a) kontinuirano jednosmjerno usmjerena b) diskontinuirano nasumično usmjerena c) ortogonalno raspoređena d) višesmjerno usmjerena [4]

Usmjerenost vlakana i njihov raspored bitno utječe na svojstva kompozitnog materijala. U slučaju kontinuirano usmjerenih vlakana (Slika 2.1a)), mehanička svojstva kompozita su anizotropna tako da je čvrstoća najveća u smjeru vlakana, dok je u okomitom smjeru najmanja. Vlakna se zbog toga polažu pod određenim kutovima kako bi se postigla što jednoličnija svojstva kompozita. Anizotropija nije uvijek nepoželjna jer se nosivost konstrukcije može bitno povećati konstruiranjem takve strukture kompozita koja osigurava lokalno veću čvrstoću tamo gdje je to najpotrebnije.

Vlakna također mogu biti duga ili kratka. Duga vlakna se lako orijentiraju i procesiraju, dok se orijentacija kratkih vlakana ne može u potpunosti kontrolirati. Primjena dugih vlakana ima brojne prednosti, poput veće otpornosti na udarna opterećenja i bolje dimenzijske stabilnosti pri udarnim opterećenjima. S druge strane kratka vlakna cjenovno su pristupačnija i imaju manje grešaka, a time i veću čvrstoću. Oblik poprečnog presjeka vlakna je najčešće kružni jer je kao takav najlakši za proizvodnju i rukovanje.

Materijal matrice treba biti duktilan i čvrst. Uloga matrice je povezivanje vlakana i osiguravanje pravilnog položaja i orijentacije vlakana. Matrica ne smije kemijski reagirati s vlaknima i mora dobro prijanjati uz vlakna. Najčešće se koriste polimerne smole, duromerne i plastomerne. Najviše se primjenjuju poliesterske i epoksidne duromerske smole. Epoksidne smole imaju bolja mehanička svojstva, ali su znatno skuplja i osjetljivija na pogreške i pojavu napuklina [4],[5].

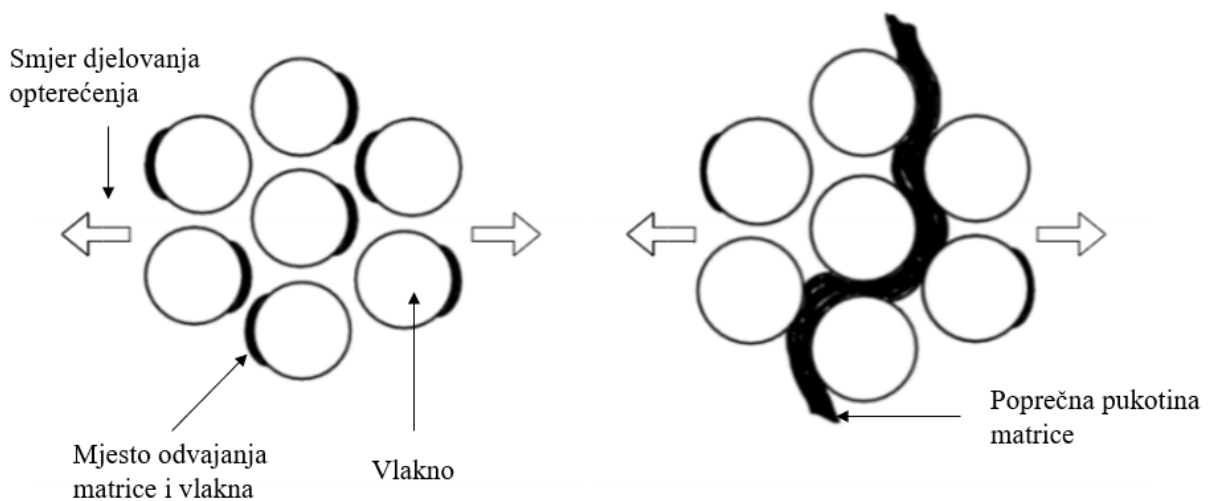
2.2. Oštećenja kompozitnih materijala

Vlaknima ojačani kompoziti, uslijed svoje visoke čvrstoće, male mase i dobre prilagodljivosti, nalaze široku primjenu u konstrukcijskim rješenjima u industriji. Ubrzano zamjenjuju konvencionalne metalne legure u raznim industrijama. Mehaničko ponašanje FRP kompozita može se lakše kontrolirati od metala jer ovisi o svojstvima konstitutivnih elemenata. Mnoge konstrukcije su često izložene vibracijama i drugim promijenjivim opterećenjima što rezultira smanjenjem zamorne čvrstoće. U kompozitnim materijalima oštećenja se uglavnom iniciraju prije nego su bilo kakve promjene vidljive golim okom [6]. Za razliku od metalnih materijala, u kojima se javlja pukotina koja propagira i dovodi do loma, u kompozitima postoje brojni mehanizmi oštećenja koji se javljaju i koji u konačnici svojim međudjelovanjem dovode do loma. Kod izotropnih, homoge-

nih materijala najčešće se koristi koeficijent intenzivnosti naprezanja za opis pukotine, pri čemu su za opis potrebni samo veličina pukotina, geometrija uzorka, uvjeti opterećenja i materijalna svojstva. Kod kompozita takav pristup nije moguć jer na inicijaciju i propagaciju pukotina utječe heterogenost i anizotropija kompozitnih materijala. Najčešći mehanizmi oštećenja koji se javljaju su pucanje matrice, odvajanje matrice i vlakna, delaminacija, lom vlakna [6].

2.2.1. Pucanje matrice i odvajanje matrice i vlakna

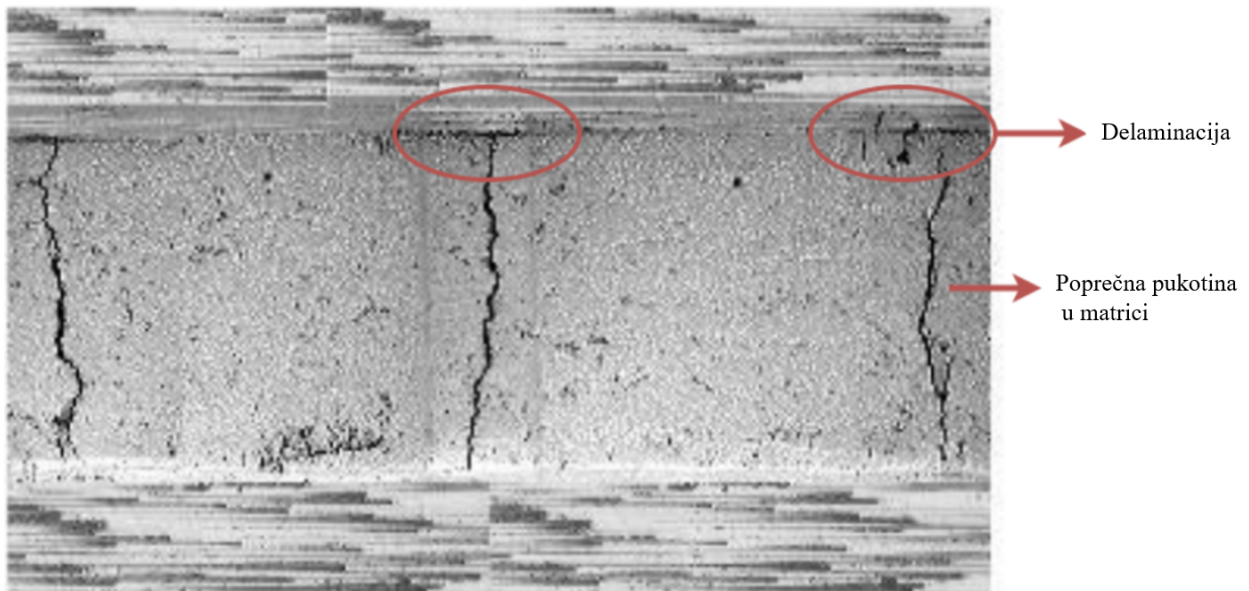
Puknuće matrice najčešće uzrokuje razvoj ostalih mehanizama oštećenja, poput loma vlakana ili delaminacije. Pucanju matrice prethodi odvajanje vlakna od matrice do kojeg najčešće dolazi kada je vanjsko opterećenje okomito na orijentaciju vlakana. Proces nastanka pukotine prikazan je na Slici 2.2. Budući da su svojstva kompozita slabija u smjeru okomitom na orijentaciju vlakna, dolazi do odvajanja matrice i vlakna koje se širi uzduž vlakna. U slučaju odvajanja vlakna i matrice na više mjesta može doći do spajanja mikro pukotina i nastanka veće poprečne pukotine prikazane na Slici 2.2. [7].



Slika 2.2: Odvajanje vlakna od matrice i nastanak poprečne pukotine [7]

2.2.2. Delaminacija

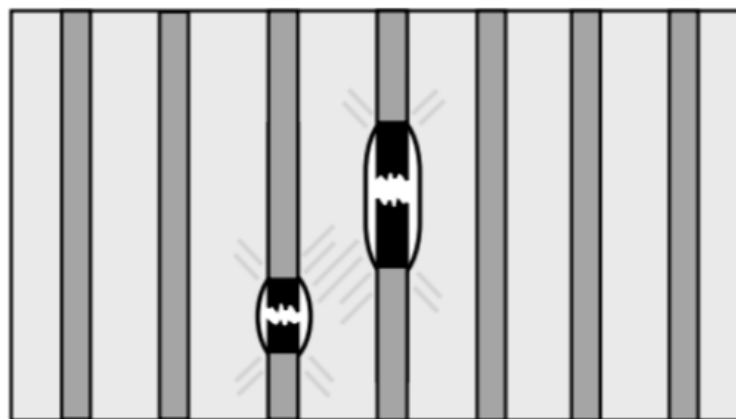
Delaminacija ili odvajanje slojeva uzrokovano je razlikom u elastičnim svojstvima između susjednih slojeva koji imaju različiti postavni kut. Kako je ranije navedeno, pucanje matrice u većini slučajeva prethodi delaminaciji. Slika 2.3. prikazuje nastanak odvajanja vlakna i matrice na spoju slojeva od 0° i 90° , koja je nastala kao posljedica poprečne pukotine u matrici. Širenjem delaminacije može doći do kolapsa konstrukcije, preuranjenog izvijanja laminata, upijanja vlage u kompozit, smanjenja krutosti [7].



Slika 2.3: Odvajanje slojeva [7]

2.2.3. Lom vlakna

Ojačala u kompozitnim materijalima izrađena su od snopova vlakana. Vlakna mogu sadržavati nesavršenosti koje nastaju tijekom proizvodnog procesa što vodi do razlike u iznosu vlačne čvrstoće vlakana. Uslijed te razlike, pri različitim razinama opterećenja može doći do izoliranih pucanja vlakana. Pucanjem pojedinog vlakna, naprezanje se prenosi na susjedno vlakno koje uslijed povećanja naprezanja dolazi u opasnost od pucanja što je prikazano na Slici 2.4. Pucanjem matrice smanjuje se prijenos naprezanja između vlakana što posljedično također može uzrokovati lom vlakna [7].



Slika 2.4: Lom vlakna [7]

2.3. Način procjene oštećenja

Za procjenu oštećenja materijala predloženi su razni pristupi među kojima nerazorna ispitivanja (eng. *Non-Destructive Testing* - NDT) pronalaze sve veću ulogu. Budući da prilikom NDT

ispitivanja nije potrebno oštetiti uzorak kako bi se odredila cjelovitost uzorka, primjenom NDT metoda smanjeni su troškovi i vrijeme trajanje ispitivanja. Osnovna podjela NDT metoda je na kontaktne i beskontakne. Kontaktne metode zahtijevaju kontakt između senzora i ispitnog uzorka. Prednost beskontaktnih metoda je kraće trajanje ispitivanja jer nema potrebe za dodiranjem između senzora i ispitnog uzorka [8]. Podjela nerazornih metoda ispitivanja prikazana je u Tablici 2.1.

Tablica 2.1: Podjela nerazornih ispitivanja [8]

Nerazorne metode ispitivanja	
Kontaktne	Beskontakne
Ultrazvučno ispitivanje	Radiografija
Eddy current ispitivanje	Termografija
Magnetsko ispitivanje	Infracrveno ispitivanje
Elektromagnetsko ispitivanje	Holografija
Ispitivanje penetratima	Lasersko ispitivanje
Ispitivanje tekućim penetratima	Vizualni pregled

U nastavku su ukratko opisane metode ispitivanja te su navedene osnovne prednosti i nedostaci [8].

- **Vizualni pregled** je najjednostavniji oblik nerazornog ispitivanja. Najveća prednost ove metode je kratko vrijeme trajanja ispitivanja i što ne zahtjeva dodatnu opremu. Veliki nedostatak je nepouzdanost dobivenih rezultata.
- **Ultrazvučnim testiranjem** se pomoću signala koji se odašilje dobivaju informacije o mjestu loma, veličini i orijentaciji pukotine. Oprema se sastoji od odašiljača, kruga prijemnika, pretvornika i zaslona. Prednosti su brzina skeniranja, dobra rezolucija, mogućnost otkrivanja pukotina i mogućnost korištenja na terenu. Glavni nedostaci su složeni ispitni postav, skupa oprema, za rukovanje opremom potrebna je dobra obuka, teško se provodi na tankim uzorcima i grubim površinama.
- **Termografija** se temelji na pretpostavci da dolazi do promjene toplinske vodljivosti unutar materijala ukoliko su prisutne nesavršenosti. Koristi se za tanke dijelove jer defekti koji su udaljeni od površine stvaraju manje promjene toplinske vodljivosti. Prednost termografije je mogućnost ispitivanja velikih površina i provođenje ispitivanja na dijelovima kojima je samo jedna strana dostupna na ispitivanje. Nedostatak predstavlja skupa i osjetljiva oprema i potreba za stručnim rukovanjem.
- **Radiografija** je najkorištenija nerazorna metoda ispitivanja. Brojne vrste radiografije omogućuju provođenje ispitivanja na širokom spektru uzoraka. Budući da je kidalica koja je

numerički analizirana u ovom radu namijenjena za radiografska ispitivanja, ova metoda je detaljnije objašnjena u slijedećem poglavlju.

- **Elektromagnetsko ispitivanje** koristi elektricitet i magnetizam za detektiranje i procjenu lomova, oštećenja, korozije i drugih nesavršenosti materijala. Elektromagnetna metoda temelji se na induciranju električnog ili magnetnog polja i promatranju elektromagnetnog odziva. U elektromagnetne metode ubrajaju se: Vrtložne struje (eng. *Eddy Current*, EC), Propuštanje magnetskog toka (eng. *Magnetic Flux Leakage*, MFL), Daljinsko terensko ispitivanje (eng. *Remote Field Testing*, RFT) itd.
- **Akustička ispitivanja** identificiraju oštećenja unutar materijala na temelju mehaničkih vibracija koje ta oštećenja generiraju. Oštećenja stvaraju valove koji se šire koncentrično, a detektiraju ih vrlo osjetljivi piezoelektrici. Metoda se razlikuje od ostalih NDT metoda po tome što prima signale koje odašilje sam uzorak, a ne odašiljač koji je dio opreme. Prednost ove metode je visoka osjetljivost na promjene u uzorku, brzo skeniranje i što nema potrebe za prethodnom pripremom uzoraka. Akustična ispitivanja imaju mogućnost otkrivanja različitih vrsta oštećenja. Nedostatak predstavlja složenost procesa povezivanja emitiranih zvučnih signala s vrstom oštećenja.
- **Laserska ispitivanja** koriste niz kamera koje bilježe refleksije laserske zrake o površinu uzorka. Ova metoda je najmanje osjetljiva na vanjske utjecaje i pogodna za ispitivanje velikih uzoraka u kratkom vremenu. Nedostatak laserskih ispitivanja je što se ne mogu koristiti na glatkim uzorcima i kompleksnost interpretacije dobivenih rezultata.

3. Računalna tomografija

Računalna tomografija je metoda koja koristi rendgenske zrake za snimanje velikog broja dvodimenzionalnih (2D) prikaza predmeta pri različitim kutevima gledanja. Dobiveni 2D zapisi se zatim softverski prevode u 3D prikaz skeniranog predmeta. CT koristi snop ionizirajućeg zračenja kako bi se mogla odrediti unutarnja i vanjska struktura mjenenog/promatranog objekta. Prvotna upotreba računalne tomografije bila je isključivo u medicini, ali se, sve većim razvojem metode, počela primjenjivati i u različitim granama industrije. Metoda svoju primjenu nalazi u ispitivanju materijala i procijenjivanju stanja inženjerskih komponenti (analiza mikrostrukture, detekcija pukotina, analiza lomova, određivanje poroznosti materijala), ali i analizi mehaničkih sklopova te reverzibilnom inženjerstvu.

3.1. Princip računalne tomografije

CT uređaj sastoji se od izvora X-zraka, različitih filtera zračenja ovisno o skeniranom mjernom objektu, rotacijskog stola, detektora emitiranih zraka i računalne jedinice za prikupljanje, obradu i vizualizaciju podataka.

Ozračivanje objekta provodi se na sljedeći način. Izvor zračenja generira rendgenske zrake koje se usmjeravaju prema detektoru zračenja. Predmet mjerenja nalazi se između izvora i detektora. Prolaskom rendgenskih zraka kroz predmet, one istovremeno oslabljuju zbog apsorpcije ili raspršenja i padaju na detektor. Intenzitet slabljenja određen je duljinom protoka zrake kroz materijal, sastavom materijala, njegovom gustoćom i snagom zračenja. Slabljenje se mjeri detektorom koji bilježi preostale rendgenske zrake koje su prošle kroz predmet. Detektor stvara električne signale koje ovise o količini dospjelog zračenja te računalnom obradom tih signala nastaje 3D slika skeniranog objekta. Volumen objekta definiran je matricom vokseli (tj. volumetrički piksel) te je svakom vokselu propisana vrijednost sive skale koja predstavlja lokalnu gustoću apsorpcije X-zraka [9],[10].

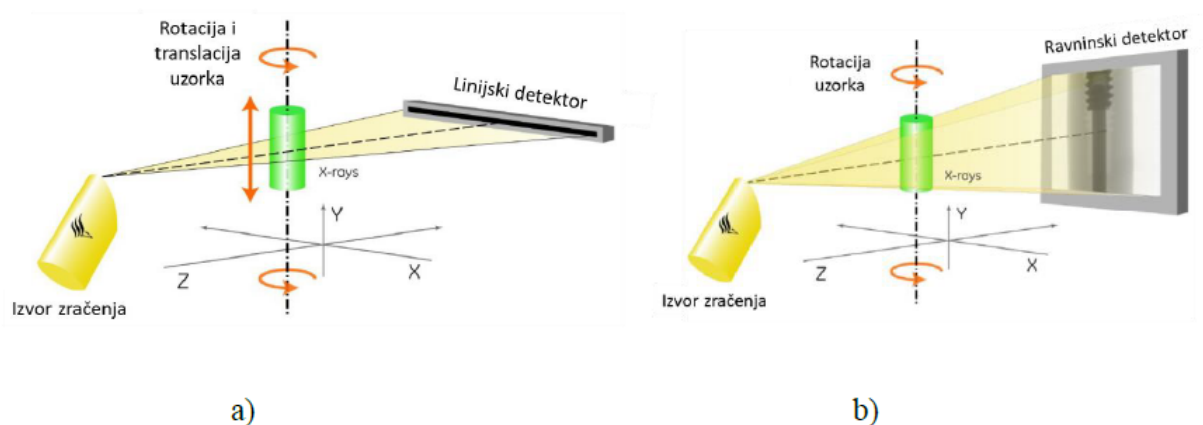
Proces skeniranja može se podijeliti u 6 faza [10]:

1. Skeniranje mjernog objekta i podešavanje parametara CT uređaja: pojačanje, orijentacija objekta, energija izvora zračenja, integracijsko vrijeme detektora i sl.
2. Po dovršetku skeniranja rekonstruira se 3D volumen objekta pomoću matematičkih algoritama. Dodatno se u ovoj fazi mogu napraviti ispravke za smanjivanje grešaka koje se javljaju

zbog različitih vanjskih faktora.

3. Određivanje graničnih vrijednosti sive skale boja koje imaju veliki utjecaj na točnost rekonstruirane geometrije.
4. Po određivanju graničnih vrijednosti generiraju se podaci o izmjerenom volumenu i površini mjernog objekta.
5. Iz dobivenih 3D skenova provodi se mjerenje unutar volumena i na površini mjernog objekta.
6. Naposljetku provodi se analiza rezultata dobivenih mjerenjem.

Postoje dvije glavne vrste industrijskih CT uređaja: 2D i 3D CT skeneri. 2D CT uređaj prikazan na Slici 3.1 a), ima ravninski izvor zračenja u obliku lepeze i linijski detektor. Prilikom skeniranja primjenom 2D CT uređaja, uzorak se istovremeno rotira i translacija te se snima jedan presjek. Ovisno o broju potrebnih presjeka postupak se ponavlja. Loša strana ove vrste uređaja je dugo vrijeme trajanja skeniranja, osobito kada se skeniraju veliki uzorci. Primjena 3D CT skenera, prikazanog na Slici 3.1 b), značajno smanjuje vrijeme snimanja. 3D CT skeneri imaju ravninski detektor X-zraka i konusni izvor zračenja. U odnosu na 2D CT skenere potrebna je samo jedna rotacija uzorka za rekonstrukciju geometrije, što značajno smanjuje trajanje skeniranja. Međutim primjenom konusnog izvora zračenja pojavljuje se rasipanje zračenja na rubovima uzorka čime dolazi do smanjenja kvalitete rekonstruirane geometrije. Kvaliteta rekonstruirane geometrije opada što je veća udaljenost promatranog dijela objekta od centra tog istog objekta. Rasipanje na rubovima moguće je smanjiti primjenom spiralnog skeniranja, tijekom kojeg se uz rotaciju uzorka istovremeno vrši translacija po osi rotacije [10].



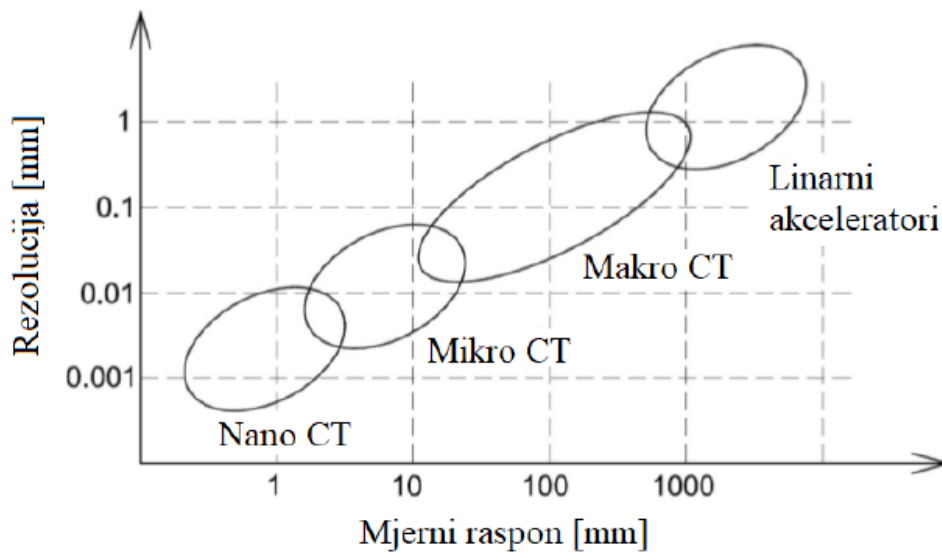
Slika 3.1: Shematski prikaz: a) 2D CT uređaja i b) 3D CT uređaja [10]

3.1.1. Tipovi laboratorijskih XCT skenera

Podjela industrijskih CT uređaja temelji se na različitim veličinama postignute rezolucije, veličini mjernog područja i veličini fokusne točke X-zračenja. CT uređaji dijele se na [10]:

- linearne akceleratori,
- makro CT,
- mikro CT i
- nano CT.

Ovisnost rezolucije o mjernom području za navedene vrste CT uređaja prikazana je na Slici 3.2 na kojoj je vidljivo da se za objekte veličine od 10 do 1000 mm koriste makro CT uređaji, koji u tom mjernom području postižu rezoluciju između 0,01 i 1 mm. Za objekte manje od 1 mm do otprilike 30 mm koriste se mikro i nano CT uređaji, koji postižu rezoluciju između 0,001 do 0,01 mm.

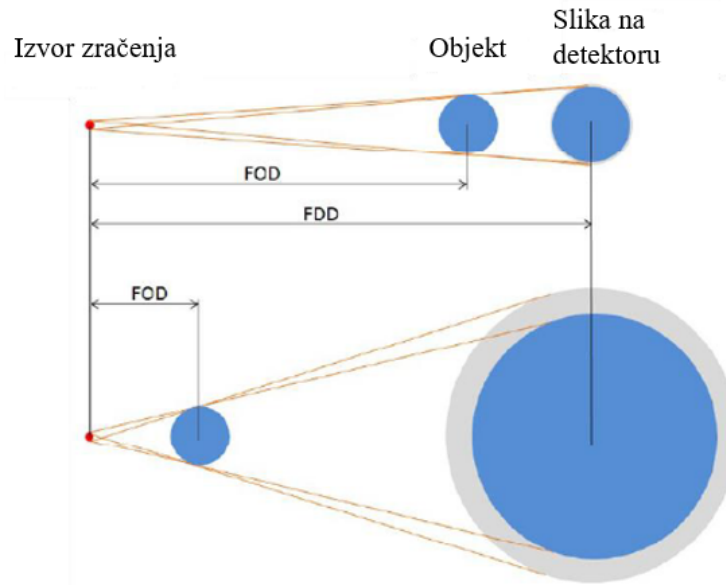


Slika 3.2: Prikaz ovisnosti rezolucije o rasponu mjerenja za industrijske CT skenere [10]

Laboratorijski μ -XCT uređaji su vrsta industrijskih CT uređaja kod kojih se postižu rezolucije mjerene u mikrometrima. Na ostvarivanje željene rezolucije utječe razmještaj izvora zračenja i detektora, koji se razlikuje ovisno o μ -XCT uređaju. Rezolucija ovisi o veličini vokselu koja između ostaloga ovisi i o pojačanju M :

$$M = \frac{FDD}{FOD}, \quad (3.1)$$

gdje je FDD udaljenost između fokusa i detektora, a FOD udaljenost između fokusa i objekta. Iz jednadžbe (3.1) vidljivo je da je uvećanje proporcionalno FDD -u i obrnuto proporcionalno FOD -u. Uređaji koji imaju mogućnost promjene FDD -a i FOD -a, tj. pomicanja izvora zračenja i detektora, imaju prednost nad uređajima koji imaju nepomičan izvor zračenja i detektor jer je kod njih jedini način za ostvarivanje uvećanja približavanje objekta izvoru, tj. smanjivanje FOD -a [10]. Prikaz promjene uvećanja u ovisnosti o položaju objekta vidljiv je na Slici 3.3.



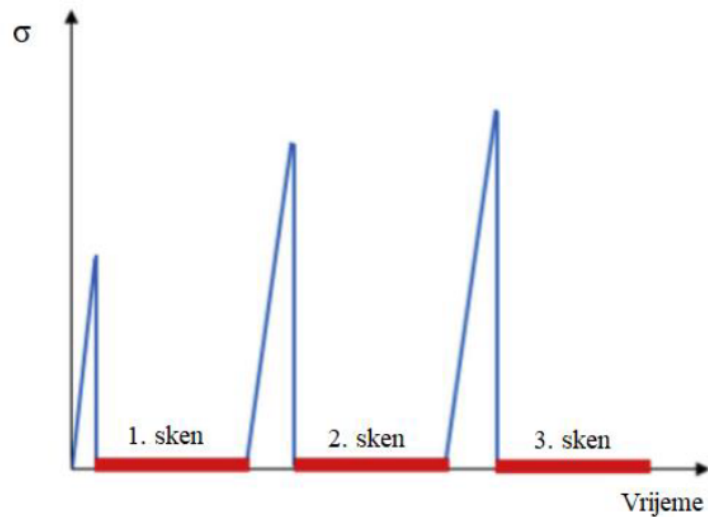
Slika 3.3: Približavanje uzorka izvoru zračenja [10]

3.2. Mehanička ispitivanja

Budući da mogu zabilježiti vanjske i unutarnje karakteristike materijala, CT metode pronalaze svoju primjenu i u području eksperimentalne mehanike. Pri mehaničkim ispitivanjima važno je zabilježiti promjenu strukture i promatranje različitih fenomena unutar kompozitnih materijala. Ako se uzorak nakon opterećivanja mora rasteretiti i zatim provesti skeniranje, govori se o *ex-situ* mehaničkim ispitivanjima, dok se kod *in-situ* mehaničkih ispitivanja uzorak istovremeno opterećuje i skenira. Mehanička ispitivanja se također mogu podijeliti i na isprekidana i kontinuirana [11].

3.2.1. Ex-situ ispitivanja

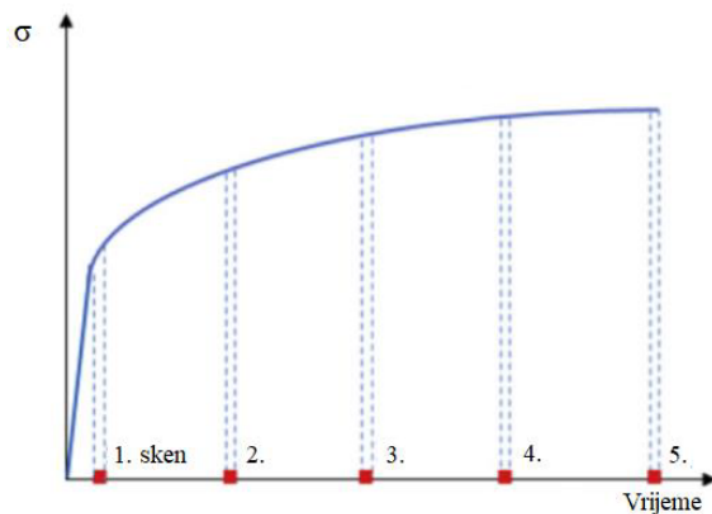
Ex-situ ispitivanja primjenom CT uređaja su naprimjereniji i najjednostavniji način provođenja mehaničkih ispitivanja. Ispitni uzorak se prvotno opterećuje, a zatim se skeniranjem uzorka u neopterećenom stanju dobiva 3D volumen promatrane zone interesa. Skeniranje u rasterećenom stanju može uzrokovati da se zanemare određeni fenomeni koji se javljaju tijekom testiranja, npr. zatvaranje pukotina uslijed rasterećenja. Međutim, promjene kao što je nelinearni odziv materijala (tj. plastičnost) trajno ostaju nakon što se uzorak rastereti. Kod *ex-situ* ispitivanja opterećenje ne mora biti nužno mehaničko, nego se ispitivanja mogu provoditi uslijed drugih vrsta opterećenja [11]. Primjer *ex-situ* ispitivanja prikazan je na Slici 3.4, gdje je vidljivo da se uzorak prvo opterećuje, zatim skenira, a potom ponovno opterećuje i skenira na isti način.



Slika 3.4: Primjer ex-situ ispitivanja [12]

3.2.2. In-situ ispitivanja

In-situ ispitivanja, za razliku od ex-situ ispitivanja, temelje se na skeniranju uzorka tijekom opterećivanja. Potreba za istodobnim opterećivanjem i skeniranjem čine in-situ postupak kompleksnim, ali istodobno omogućuje bilježenje svih efekata koji se tijekom ex-situ ispitivanja propuste zbog potrebe za rasterećivanjem uzorka. Ovaj tip ispitivanja zahtjeva dizajniranje specijalnih ispitnih uređaja (tj. kidalica) koji su smješteni unutar CT skenera i pričvršćeni na rotacijski stol CT skenera. Ti uređaji ne smiju ometati snimanje niti zaklanjati projekcije X-zraka te su zato kućišta u kojima je smješten uzorak rađena od materijala koji omogućuju prolaz X-zraka [11]. Primjer in-situ ispitivanja prikazan je na Slici 3.5. Uzorak se opterećuje cijelo vrijeme, a skenovi se rade u određenim vremenskim intervalima.



Slika 3.5: Primjer in-situ ispitivanja [12]

4. In-situ ciklička kidalica

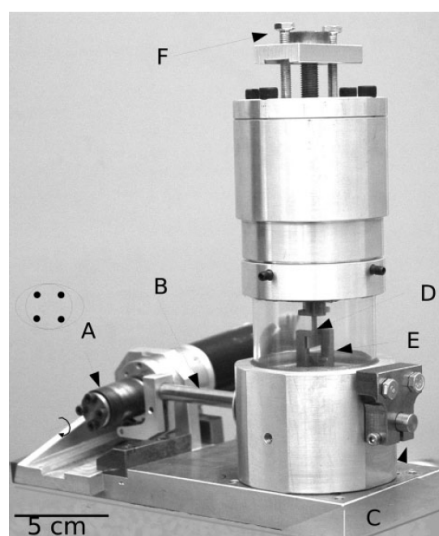
Za potrebe istraživačkog projekta FULLINSPECT razvijena je ciklička kidalica za XCT ispitivanja. Na početku je dan kratki pregled do sada dostupnih in-situ cikličkih kidalica u svrhu razumijevanja načina funkcioniranja kidalice. Budući da su in-situ ispitivanja relativno novo područje ispitivanja, pronađen je vrlo mali broj dostupnih in-situ uređaja. Većina in-situ uređaja izrađena je za potrebe specifičnih projekata te potom nisu doživjele širu upotrebu.

4.1. Pregled postojećih in-situ cikličkih kidalica

Dostupnim kidalicama, kao i kidalici čiji je numerički proračun proveden u ovom radu, cijev povezuje gornji i donji dio kućišta te prenosi silu. Budući da je tijekom skeniranja ključno da se ne zakloni ni jedna projekcija X-zrake, cijev mora biti izrađena od materijala transparentnog za X-zrake.

4.1.1. Ciklička kidalica 1

U sklopu znanstvenog istraživanja [13], koje se bavi proučavanjem pukotina iniciranih uslijed zamora metalnih materijala, razvijena je ciklička kidalica. Kidalica može postizati frekvenciju opterećenja do 50 Hz [13] te je prikazana na Slici 4.1.

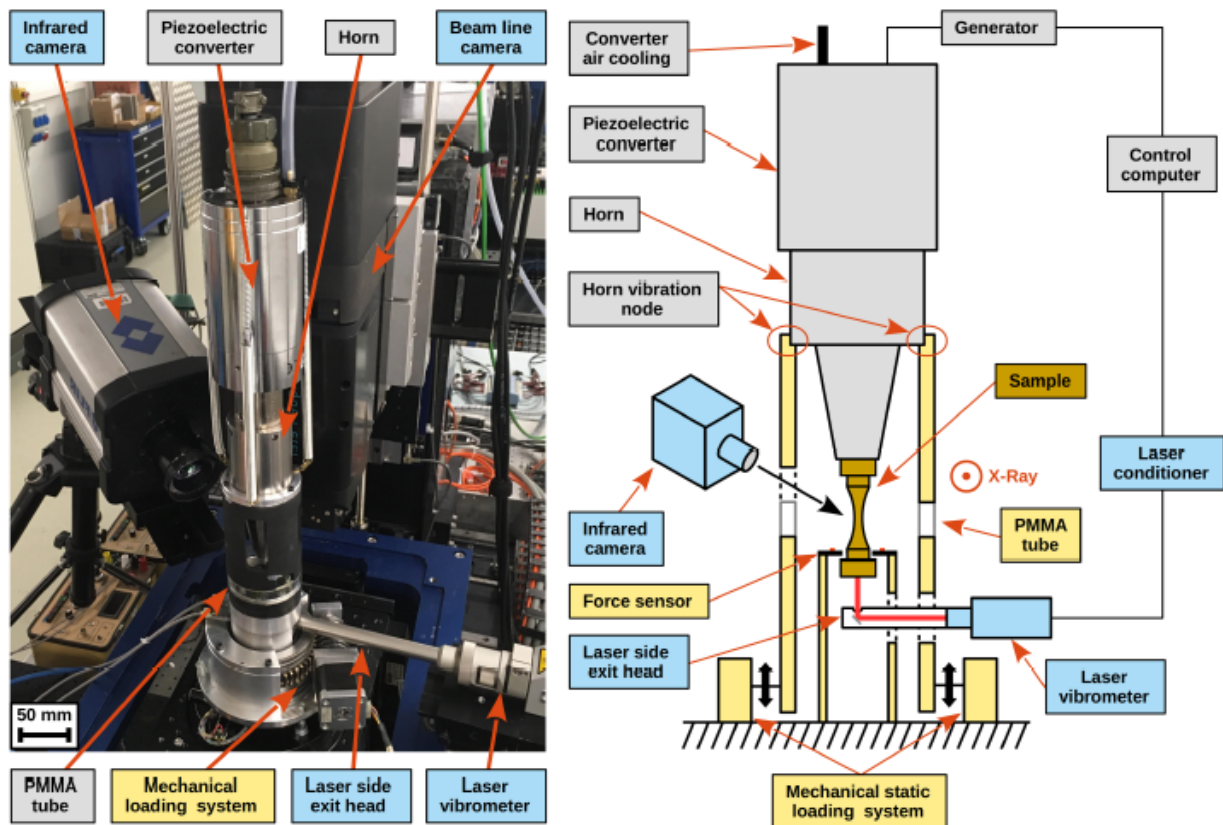


Slika 4.1: Ciklička kidalica 1 [13]

Kako bi se ostvarilo cikličko opterećenje uzorka vratilo je izrađeno u eliptičnom obliku (oznaka A na Slici 4.1). Vratilo rotira i aktivira polugu (označena slovom B na Slici 4.1) koja je pričvršćena na jednom kraju kidalice (označeno slovom C na Slici 4.1). Uzorak (označen slovom D na Slici 4.1) s donje je strane pričvršćen čeljustima (označeno slovom E na Slici 4.1) koje su vezane za polugu. Vijci (označeni slovom F na Slici 4.1) pričvršćeni su na gornju čeljust i reguliraju iznos sile cikličkog opterećenja na uzorak [13]. Potrebno je naglasiti da ova kidalica ima konstantnu amplitudu pomaka.

4.1.2. Ciklička kidalica 2

Za razliku od prethodne cikličke kidalice koja koristi vratilo i može postizati frekvencije do 50 Hz druga ciklička kidalica koristi ultrazvučni pristup [14]. Ultrazvučne kidalice mogu razvijati frekvencije uzbude od 15 do 30 kHz. Konvencionalnim načinom bi ispitivanja koja se rade na npr. 10^7 ciklusa pri frekvenciji od 100 Hz trajala 12 dana, dok bi korištenjem ultrazvučnih kidalica, pri frekvenciji 20 kHz, trajala 9 minuta. Na taj se način značajno štedi vrijeme i novac. Ultrazvučni dio kidalice (označen sivom bojom na Slici 4.2) sastoji se od generatora, koji u slučaju ove kidalice generira električni signal od 20 kHz. Generator pokreće piezoelektrični konverter koji transformira električni signal u longitudinalne ultrazvučne valove i mehaničke vibracije iste frekvencije kao i signal. Ultrazvučni rog pojačava mehaničke vibracije koje je generirao konverter. Rog je preko cijevi spojen na mehanički sustav za opterećivanje uzorka (označen žutom bojom na Slici 4.2), koji se sastoji od pužnog kola kojim se kontrolira narinuto opterećenje. Kidalica može na uzorak narinuti opterećenje do 1 kN, koje kontrolira senzor. Budući da kidalica radi na visokim frekvencijama, u uzorku i konverteru razvijaju se visoke temperature, a navedene komponente moguće je hladiti pomoću komprimiranog zraka [14]. Ciklička kidalica prikazana je na Slici 4.2.



Slika 4.2: Ciklička kidalica 2 [14]

4.2. Princip rada razvijene cikličke kidalice

Ciklička kidalica razvijena u sklopu projekta FULLINSPECT, poput gore navedenih kidalica, koristi cijev koja povezuje gornji i donji dio kidalice i koja omogućuje prolaz X-zraka. Cijev je izrađena od polimetilmetakrilata (eng. *Polymethylmethacrylate*-PMMA). Vanjske dimenzije kidalice iznose 211 x 166 x 456 mm, dok masa kidalice iznosi otprilike 40 kg. Koncept razvijene kidalice prikazan je na Slici 4.3, dok su pojedini dijelovi kidalice navedeni u Tablici 4.1.



Slika 4.3: 3D prikaz cikličke kidalice

Pogon je smješten u donjem dijelu uređaja i sastoji se od vratila (označeno brojem 1 na Slici 4.4) koje je četvrtastog presjeka te je uležišteno u prstenu (označeno brojem 2 na Slici 4.4). Budući da vratilo nije simetrično uležišteno u prsten, centar rotacije prstena nije na osi rotacije vratila. Gibanje se do klina (označen brojem 4 na Slici 4.4) prenosi preko kućišta (označeno brojem 3 na Slici 4.4) koje uslijed ekscentrične rotacije prstena povlači klin te se time rotacijsko gibanje vratila prenosi u translacijsko gibanje klina. Ispitni uzorak (označen brojem 7 na Slici 4.4) pričvršćen je u čeljusti klina (označene brojem 6 na Slici 4.4).



Slika 4.4: Bočni presjeci kidalice

Tablica 4.1: Nomenklatura pojedinih dijelova kidalice

Broj dijela	Naziv dijela
1	Vratilo
2	Prsten
3	Kućište prstena
4	Klin
5	Fiksni dio postolja
6	Čeljusti klina
7	ispitni uzorak
8	Šina
9	Vagon
10	Pomični dio postolja

Posebnost ove razvijene kidalice je mogućnost promjene amplitude pomaka uzorka. Vratilo, prikazano zasebno na Slici 4.5, izrađeno je s usponom od 2° u odnosu na os rotacije vratila i uležišteno u pomičnom dijelu postolja (označeno brojem 10 na Slici 4.4). Pomični dio postolja nalazi se na vagonu (označen brojem 9 na Slici 4.4) koji se može pomicati po šini (označena brojem 8 na Slici 4.4). Pomakom pomičnog dijela postolja, duž osi rotacije vratila, pomiče se i vratilo, a prsten zbog uspona vratila mijenja svoj položaj u smjeru translacijskog gibanja klina, što

posljedično mijenja amplitudu pomaka uzorka. Interval pomaka vratila iznosi 30 mm, a za pomak vratila od 1 mm, dobije se promjena amplitude pomaka uzorka od 0,03 mm. Na taj način se na razvijenoj kidalici mogu ispitivati uzorci na amplitudama pomaka koje variraju od 0,1 mm do 1 mm. Pomak pomičnog dijela postolja ostvaren je preko zupčanika, koji su povezani s motorom, i dva vretena. Kidalica je preko fiksnog dijela postolja (označen brojem 5 na Slici 4.4) vijcima vezana za rotacijski stol tomografa i predviđena je za frekvenciju rada do 50 Hz.



Slika 4.5: Vratilo

5. Numerička analiza cikličke kidalice

Dinamička analiza cikličke kidalice provedena je metodom konačnih elemenata. Na početku ovog poglavlja objašnjena je teorijska pozadina metode konačnih elemenata i prikazani su korišteni konačni elementi. Opisana je metoda modalne analize, korišteni model prigušenja i implicitna numerička metoda. Prikazan je pojednostavljeni model kidalice te su opisane korištene veze. Na kraju poglavlja dani su rezultati frekvencijske i dinamičke analize.

5.1. Metoda konačnih elemenata

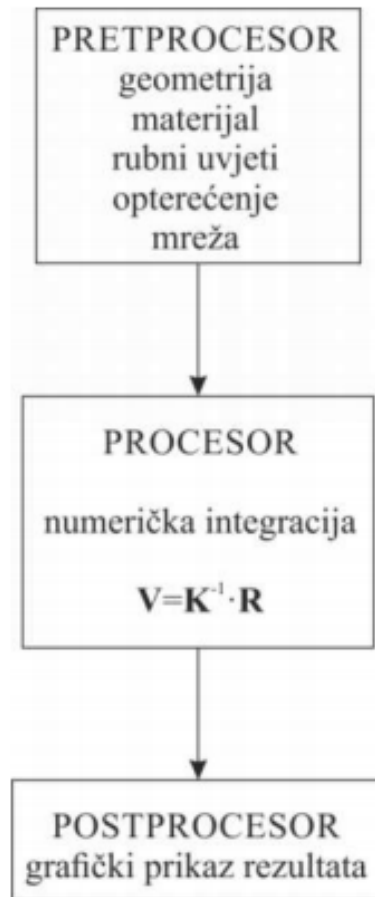
Problemi mehanike deformabilnih tijela koji se analiziraju klasičnim metodama temelje se na rješavanju diferencijalnih jednadžbi. U općem slučaju vrlo je teško dobiti rješenje koje zadovoljava diferencijalnu jednadžbu u cijelom području razmatranog modela. Za složenije modele koriste se numeričke metode koje daju približno rješenje tih diferencijalnih jednadžbi [15]. Neke od numeričkih metoda za približno rješavanje diferencijalnih jednadžbi su:

- metoda konačnih razlika,
- metoda konačnih elemenata,
- metoda konačnih konačnih volumena.

Metoda konačnih elemenata je numerička metoda koja se temelji na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma. Razmatrani kontinuum koji ima beskonačno stupnjeva slobode gibanja zamjenjuje se s diskretnim modelom međusobno povezanih elemenata s ograničenim brojem stupnjeva slobode. Time se umjesto diferencijalnih jednadžbi, rješava sustav algebarskih jednadžbi. Konačni elementi spajaju se u čvorovima, koji ovisno o tipu elementa, imaju određeni broj stupnjeva slobode. Korištenjem interpolacijskih polinoma opisuju se polja fizikalnih veličina (pomaka, naprezanja, deformacija itd.). Najprije se izvode algebarske jednadžbe na razini konačnog elementa koje se nakon toga transformiraju u globalni sustav jednadžbi diskretiziranog modela. Povećanjem broja konačnih elemenata rješenje algebarskih jednadžbi približava se analitičkom rješenju. Budući da porastom broja konačnih elemenata raste i broj nepoznanica u sustavu, za rješavanje sustava jednadžbi potrebno je koristiti neke od računalnih programa [15]. Postoji više različitih računalnih programa koji se temelje na metodi konačnih elemenata. Svaki od njih nudi brojne mogućnosti, ali se uglavnom temelje na istom principu rada, koji je shematski prikazan na Slici 5.1. Na Slici 5.1 \mathbf{V} predstavlja vektor pomaka, \mathbf{K} matricu krutosti, a \mathbf{R} vektor sila. Prema Slici 5.1, rad programskog

paketa dijeli se u tri cjeline:

- pretprocesor,
- procesor,
- postprocesor.



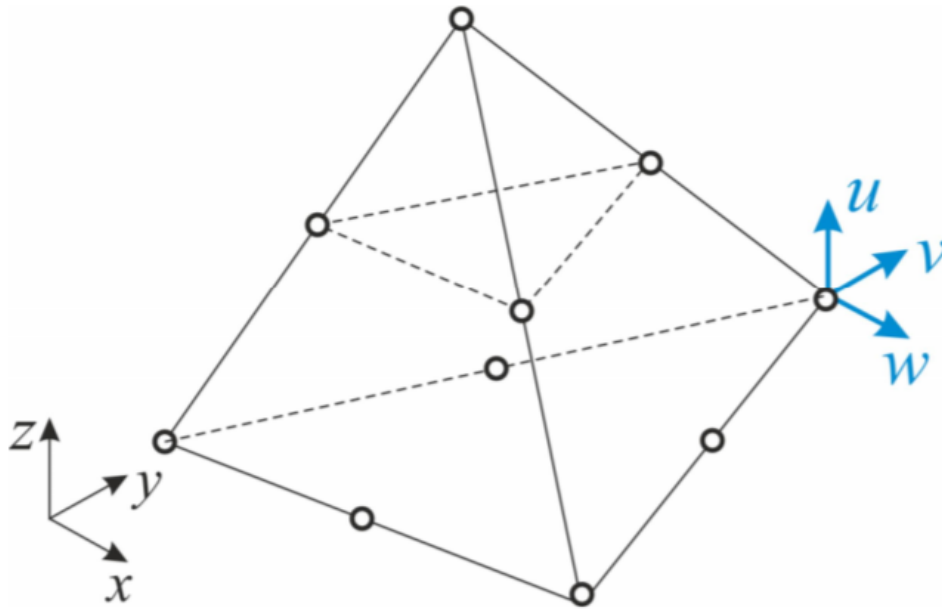
Slika 5.1: Shematski prikaz rada programskog paketa *Abaqus* [15]

Za izradu ovog diplomskog zadatka korišten je programski paket *Abaqus*.

5.2. Korišteni konačni elementi

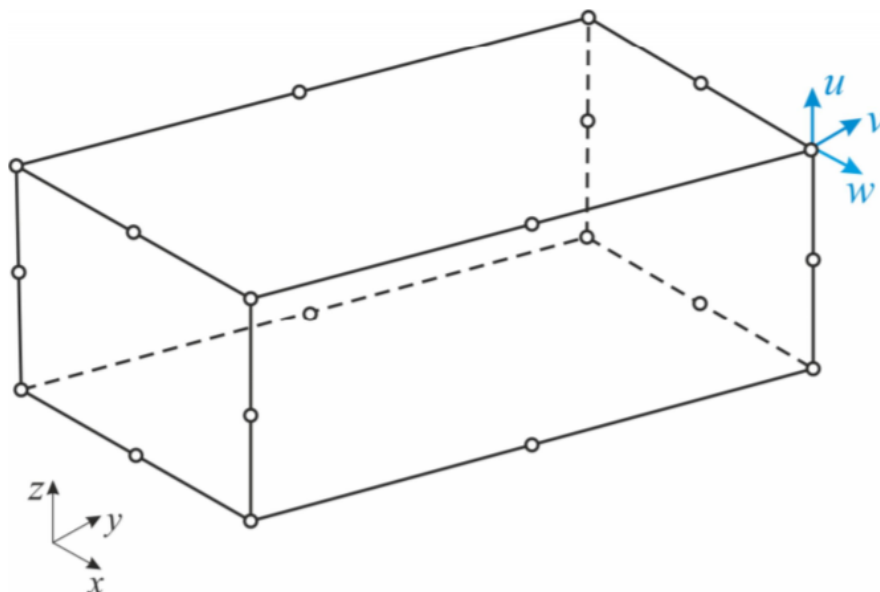
Ovisno o problemu koji je potrebno riješiti, postoji više tipova konačnih elemenata. U nastavku je dan kratak opis tetraedarskog i heksaedarskog konačnog elementa drugog reda i njihova oznaka u programu *Abaqus*.

Tetraedarski element drugog reda ima čvorove u vrhovima tetraedra i polovištima njegovih stranica. Ovaj element ima ukupno 10 čvorova i 30 stupnjeva slobode, a prikazan je na Slici 5.2. Stupnjevi slobode su pomaci u smjerovima koordinatnih osi Kartezijevog koordinatnog sustava. Polje pomaka opisano je potpunim polinomom drugog reda, a oznaka u *Abaqus*-u je C3D10 [15].



Slika 5.2: Tetraedarski element drugog reda C3D10 [16]

Na Slici 5.3 prikazan je heksaedarski *serendipity* element drugog reda C3D20. Za razliku od Lagrangeovih heksaedarskih elemenata drugog reda, *serendipity* element nema čvorove unutar elementa što smanjuje broj stupnjeva slobode. *Serendipity* element ukupno ima 20 čvorova i 60 stupnjeva slobode, koji su pomaci u smjerovima koordinatnih osi x , y , z Kartezijevog koordinatnog sustava [15].



Slika 5.3: Heksaedarski element drugog reda C3D20 [16]

Prednost tetraedarskih konačnih elemenata je u tome što lakše diksretiziraju složenije geometrije, dok je prednost heksaedarskih viši stupanj polinoma koji opisuje polje pomaka [15].

5.3. Metoda modalne analize

U sklopu dinamičke analize konstrukcije bitno svojstvo predstavljaju njezine vlastite frekvencije. Ako na sustav djeluju vanjske periodične sile frekvencijama različitim od njegovih vlastitih, sustav će titrati u frekvencijama vanjske sile. Ukoliko se frekvencija uzbude izjednači s vlastitom frekvencijom sustava, amplitude titranja postaju velike te nastaje rezonancija. Zato je prilikom razvoja konstrukcije potrebno voditi računa o vlastitim frekvencijama sustava, kako bi se izbjeglo da planirane frekvencije uzbude budu blizu rezonantnim frekvencijama. Za određivanje vlastitih frekvencija sustava koristi se modalna analiza.

Modalna analiza je metoda kojom se jednadžbe gibanja, izražene u fizičkim koordinatama, primjenom vlastitih vrijednosti (engl. *Eigenvalue*) transformiraju u modalne koordinate. Na taj se način dobiva sustav raspregnutih jednadžbi gdje se svaka jednadžba može zasebno rješavati. Transformirane jednadžbe nazivaju se modalnim jednadžbama [17].

Kako je već ranije navedeno u potpoglavlju 5.1, svako tijelo ima beskonačni broj stupnjeva slobode gibanja i samim time i beskonačni broj vlastitih frekvencija, a za svaku vlastitu frekvenciju odgovarajuću formu vibriranja. Metodom konačnih elemenata dobiva se diskretizirani model s konačnim brojem vlastitih frekvencija. Jednadžba gibanja diskretnog sustava glasi [17]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{V}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{V}} + \mathbf{K}\mathbf{V} = \mathbf{R}(t), \quad (5.1)$$

gdje su \mathbf{M} , \mathbf{C} i \mathbf{K} $n \times n$ matrice masa, prigušenja i krutosti sustava, a $\ddot{\mathbf{V}}$, $\dot{\mathbf{V}}$ i \mathbf{V} $n \times 1$ vektori ubrzanja, brzine i pomaka u kojima n predstavlja broj stupnjeva slobode gibanja. Ako se promatraju slobodne neprigušene vibracije sustava, jednadžba gibanja glasi:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{V}} + \mathbf{K}\mathbf{V} = \mathbf{0}. \quad (5.2)$$

Uvrštavanjem pretpostavljenog općeg rješenja diferencijalnih jednadžbi i njegovih derivacija [17]:

$$\mathbf{V}(t) = \bar{\mathbf{V}} \sin(\omega t), \quad (5.3)$$

$$\dot{\mathbf{V}}(t) = \bar{\mathbf{V}}\omega \cos(\omega t), \quad (5.4)$$

$$\ddot{\mathbf{V}}(t) = -\bar{\mathbf{V}}\omega^2 \sin(\omega t), \quad (5.5)$$

dobije se rješenje diferencijalnih jednadžbi gibanja:

$$[\mathbf{K} - \omega^2\mathbf{M}]\bar{\mathbf{V}} = \mathbf{0}, \quad (5.6)$$

što se još naziva problem vlastitih vrijednosti. U jednadžbi (5.6), $\bar{\mathbf{V}}$ predstavlja vektor amplituda čvornih pomaka, a ω^2 kvadrat vlastitih kružnih frekvencija. Ako se zanemari trivijalno rješenje $\bar{\mathbf{V}} = \mathbf{0}$, rješavanjem netrivialnog rješenja:

$$\det[\mathbf{K} - \omega^2\mathbf{M}] = 0, \quad (5.7)$$

dobije se polinom n -tog reda po ω^2 iz kojeg se rješavanjem dobije n rješenja, odnosno vlastitih kružnih frekvencija ω_i ($i=1,2, \dots, n$). Budući da su matrice \mathbf{K} i \mathbf{M} pozitivno definitne, sve vlastite

frekvencije su realni pozitivni brojevi. Svakoj vlastitoj frekvenciji ω_i odgovara vlastiti mod ili vektor $\bar{\mathbf{V}}_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$) te vrijedi:

$$[\mathbf{K} - \omega_i^2 \mathbf{M}] \bar{\mathbf{V}}_i = \mathbf{0}. \quad (5.8)$$

Vlastiti vektori međusobno su okomiti, iz čega proizlazi kako će umnožak matrica masa i krutosti s modalnim vektorima biti [17]:

$$\bar{\mathbf{V}}_i^T \mathbf{K} \bar{\mathbf{V}}_j = 0, \quad (5.9)$$

$$\bar{\mathbf{V}}_i^T \mathbf{M} \bar{\mathbf{V}}_j = 0, \quad (5.10)$$

za $i \neq j$, a kada je $i=j$ dobije se:

$$\bar{\mathbf{V}}_i^T \mathbf{K} \bar{\mathbf{V}}_i = \omega_i^2, \quad (5.11)$$

$$\bar{\mathbf{V}}_i^T \mathbf{M} \bar{\mathbf{V}}_i = 1. \quad (5.12)$$

5.4. Model prigušenja

Pobuđena konstrukcija, po prestanku pobude, nakon nekog konačnog vremena prestaje oscilirati. Opadanje amplitude odziva konstrukcije upućuje na disipaciju energije sustava pri osciliranju. Neke od pojava koje uzrokuju prigušenje su: toplinski učinci uslijed unutarnjeg trenja u materijalu, otpor zraka pri gibanju, trenje u spojevima itd. Uslijed kompleksnosti pojava koje uzrokuju prigušenje, praktično je nemoguće opisati svaki od mehanizama disipacije energije u realnim konstrukcijama. Iz navedenog proizlazi potreba za idealizacijom mehanizama prigušenja sa svrhom odgovarajućeg obuhvaćanja prigušenja matematičkim modelom [18]. U nastavku je opisan Rayleigh-ev model prigušenja koji je korišten tijekom numeričkog proračuna cikličke kidalice.

5.4.1. Rayleigh-evo prigušenje

Jedan od najkorištenijih modela prigušenja je model proporcionalnog prigušenja, odnosno Rayleigh-evo prigušenje [17]. Matrica prigušenja \mathbf{C} iz jednadžbe (5.1) modelira se kao linearna kombinacija prigušenja proporcionalnog matricama \mathbf{M} i \mathbf{K} :

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K}. \quad (5.13)$$

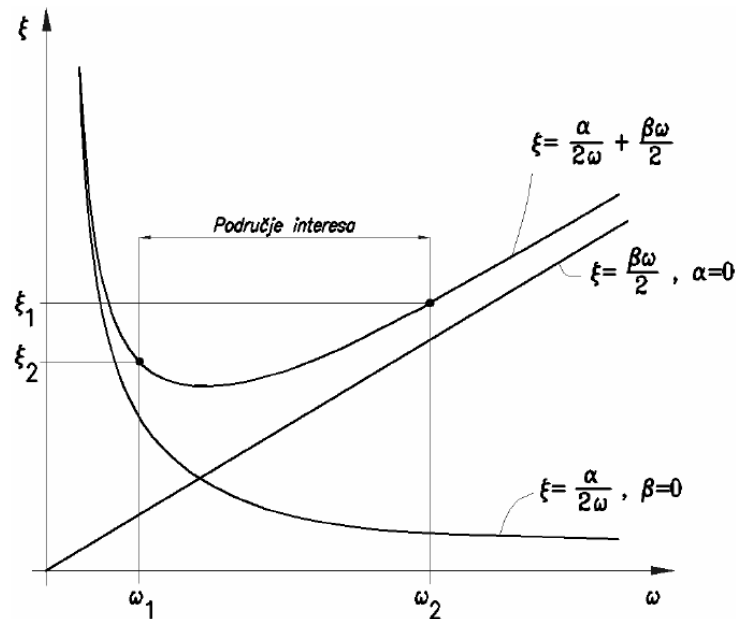
Matrica \mathbf{C} nema fizikalnog značenja. Koeficijenti α i β , s odgovarajućim mjernim jedinicama $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ za α i $\frac{\text{s}}{\text{rad}}$ za β , određuju se prema izrazu:

$$\zeta_i = \left(\frac{\alpha}{2\omega_{n,i}} + \frac{\beta\omega_{n,i}}{2} \right), \quad (5.14)$$

u kojem ζ predstavlja koeficijent prigušenja:

$$\zeta = \frac{c}{c_{kr}}, \quad (5.15)$$

gdje c_{kr} predstavlja kritični iznos prigušenja za koji neće doći do periodičkog gibanja sustava. Ovisnost prigušenja o frekvenciji prikazana je na Slici 5.4.



Slika 5.4: Ovisnost Rayleigh-evog prigušenja o frekvenciji [18]

Frekvencije za koje se definiraju vrijednosti koeficijenta prigušenja nazivaju se kontrolne frekvencije. Kako su podaci o promjeni ζ s promjenom frekvencije dostupni samo u rijetkim slučajevima, obično se pretpostavlja jednako prigušenje za obje kontrolne frekvencije ($\zeta_1 = \zeta_2$). Kod proračuna Rayleigh-evim postupkom obično se za vrijednost ω_1 uzima prva vlastita frekvencija, a za ω_2 jedna od viših frekvencija. Na taj način će vlastiti modovi s frekvencijama između ω_1 i ω_2 imati nešto niže vrijednosti prigušenja od prigušenja definiranog za frekvencije ω_1 i ω_2 . Istovremeno će svim modovima s frekvencijom većom od ω_2 biti pridruženo prigušenje veće od ζ koje monotono raste pri porastu frekvencije. Utjecaj visokih modova praktično se eliminira jer je svakom pridružen visoki koeficijent prigušenja [18].

5.5. Implicitna numerička metoda

Programski paket *Abaqus* koristi dva načina numeričke integracije: eksplicitnu i implicitnu. Eksplicitna metoda koristi se za probleme kratkotrajne vremenski promijenjive analize, nelinearne i kvazistatičke analize s velikim deformacijama, analize kolapsa te analize propagacije valova. Eksplicitna metoda zahtjeva kvalitetnu mrežu konačnih elemenata kako bi rješenje konvergiralo. Implicitna metoda koristi se za statičke i dinamičke analize koje imaju dulje vrijeme trajanja [19].

Integracija implicitnom metodom provodi se na način da se za računanje nepoznatih veličina u trenutku $t + \Delta t$ koriste poznate veličine izračunate u trenutku t i nepoznate veličine iz trenutka $t + \Delta t$. Nepoznate veličine nalaze se i s lijeve i desne strane jednadžbe pa je potrebno za rješavanje koristiti iteracijske postupke s unaprijed zadanom točnošću. Jedna od najčešće korištenih

implicitnih metoda je Newmark-ova metoda. Jednadžba gibanja za trenutak $t + \Delta t$ glasi [17]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{V}}_{t+\Delta t} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{V}}_{t+\Delta t} + \mathbf{K}\mathbf{V}_{t+\Delta t} = \mathbf{F}_{t+\Delta t}^r. \quad (5.16)$$

Pretpostavke za promjenu pomaka i brzine unutar intervala Δt su [17]:

$$\mathbf{V}_{t+\Delta t} = \mathbf{V}_t + \Delta t\dot{\mathbf{V}}_t + \frac{(\Delta t)^2}{2}[(1 - 2\beta)\ddot{\mathbf{V}}_t + 2\beta\ddot{\mathbf{V}}_{t+\Delta t}], \quad (5.17)$$

$$\dot{\mathbf{V}}_{t+\Delta t} = \dot{\mathbf{V}}_t + \Delta t[(1 - \gamma)\ddot{\mathbf{V}}_t + \gamma\ddot{\mathbf{V}}_{t+\Delta t}], \quad (5.18)$$

gdje su β i γ odabrane konstante koje određuju numeričko prigušenje. Uvrštavanjem (5.17) i (5.18) u jednadžbu gibanja (5.16) dobiva se:

$$\begin{aligned} & \mathbf{M}\ddot{\mathbf{V}}_{t+\Delta t} + \mathbf{C}\left\{\dot{\mathbf{V}}_t + \Delta t[(1 - \gamma)\ddot{\mathbf{V}}_t + \gamma\ddot{\mathbf{V}}_{t+\Delta t}]\right\} + \\ & + \mathbf{K}\left\{\mathbf{V}_t + \Delta t\dot{\mathbf{V}}_t + (\Delta t)^2\left[\left(\frac{1}{2} - \beta\right)\ddot{\mathbf{V}}_t + \beta\ddot{\mathbf{V}}_{t+\Delta t}\right]\right\} = \mathbf{R}_{t+\Delta t}, \end{aligned} \quad (5.19)$$

što se može zapisati u obliku:

$$\mathbf{K}_{\text{cm}}\ddot{\mathbf{V}}_{t+\Delta t} = \mathbf{F}_{t+\Delta t}^r, \quad (5.20)$$

gdje je:

$$\mathbf{K}_{\text{cm}} = [\mathbf{K}\beta(\Delta t)^2 + \mathbf{C}\gamma\Delta t + \mathbf{M}], \quad (5.21)$$

$$\mathbf{F}_{t+\Delta t}^r = \mathbf{F}_{t+\Delta t}^e - \mathbf{K}\left\{\mathbf{V}_t + \Delta t\dot{\mathbf{V}}_t + (\Delta t)^2\left(\frac{1}{2} - \beta\right)\ddot{\mathbf{V}}_t\right\} - \mathbf{C}\left\{\dot{\mathbf{V}}_t + \Delta t(1 - \gamma)\ddot{\mathbf{V}}_t\right\}. \quad (5.22)$$

Ubrzanje se izračunava iz jednadžbe (5.20):

$$\ddot{\mathbf{V}}_{t+\Delta t} = \mathbf{K}_{\text{cm}}^{-1}\mathbf{F}_{t+\Delta t}^r. \quad (5.23)$$

Algoritam implicitne integracije u vremenskom inkrementu sastoji se od 4 koraka [17]:

1. \mathbf{V}_0 i $\dot{\mathbf{V}}_0$ su poznati iz početnih uvjeta, dok se $\ddot{\mathbf{V}}_0$, ako nije zadano, izračunava iz dinamičke ravnoteže:

$$\ddot{\mathbf{V}}_0 = (\mathbf{M})^{-1} \cdot (\mathbf{F}^e - \mathbf{F}^i)_0 = (\mathbf{M})^{-1} \cdot \{\mathbf{F}^e - [\mathbf{C}\dot{\mathbf{V}}_0 + \mathbf{K}\mathbf{V}_0]\}. \quad (5.24)$$

2. Ubrzanja u sljedećem koraku izračunavaju se pomoću izraza (5.23).
3. Iz izraza (5.17) i (5.18) izračunavaju se pomaci $\mathbf{V}_{\Delta t}$ i brzine $\dot{\mathbf{V}}_{\Delta t}$.
4. Postavljanje $t + \Delta t$ umjesto t i vraćanje na 1. korak.

U svakom vremenskom koraku potrebno je riješiti jednadžbu (5.20), što je računalno zahtjevno i vodi sporom rješavanju problema. *Abaqus* primjenjuje automatski postupak vremenske inkrementacije koji se temelji na Newtonovoj iterativnoj metodi. Ovom metodom dinamička ravnoteža zadovoljava se na kraju inkrementa te se za taj vremenski trenutak određuju pomaci [17].

5.6. Korištene kinematske veze

Model kidalice namijenjen za numeričku analizu sastoji se od više dijelova koje je potrebno međusobno povezati. Pri tome je potrebno voditi računa da nametnute veze budu fizikalne i po mogućnosti da ne budu prezahtjevne za analizu. U nastavku je dan pregled kinematskih veza u programskom paketu *Abaqus*, koje su korištene u ovome radu.

5.6.1. *Distributing coupling*

Distributing coupling veže translacije i rotacije čvorova odabrane površine s translacijama i rotacijama referentnog čvora. Sila na referentni čvor se, korištenjem težinskih faktora, distribuira na čvorove površine. Iznos težinskih faktora određuje raspodjelu sile i momenata na čvorove referentne površine. Za razliku od *kinematic couplinga*, *distributing coupling* ne eliminira stupnjeve slobode na površini. Glavni uvjet koji *distributing coupling* mora ispuniti je da rezultanta sila i momenata na vezanim čvorovima mora biti jednaka silama i momentima na referentnom čvoru. Također, koristeći ovu definiciju *couplinga*, moguće je ostvariti relativne pomake na referentnoj površini. Koristeći unaprijed zadane postavke, težinski faktor za *distributing coupling* iznosi 1.0 [19].

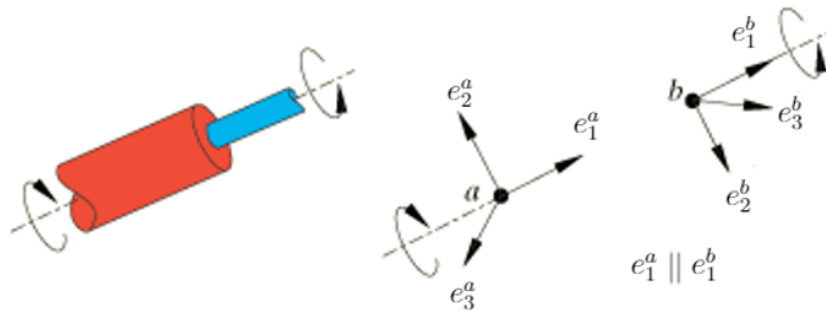
5.6.2. *Hinge*

Hinge veza je definicija *connector* elementa, sastavljena od *Join* i *Revolute* osnovnih veza, koja se koristi između elemenata koji međusobno rotiraju. Veza *Join* izjednačava položaj točaka a i b . Ukoliko položaj točke b na početku nije jednak položaju točke a , pozicija točke b u odnosu na a održava se fiksnom [19]. *Join* veza prikazana je na Slici 5.5.



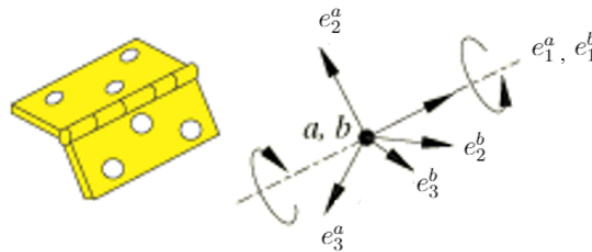
Slika 5.5: *Join* veza [19]

Osnovna veza *Revolute* dopušta rotaciju dvije točke oko zajedničke osi rotacije, dok onemogućava rotaciju oko dvije lokalne osi okomite na os rotacije [19]. *Revolute* veza prikazana je na Slici 5.6 na kojoj se vidi da je rotacija točaka a i b moguća samo oko osi e_1 .



Slika 5.6: Revolute veza [19]

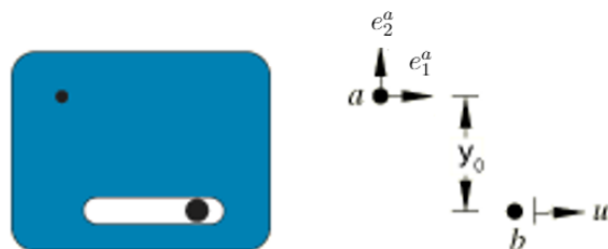
Hinge veza povezuje pozicije dvije točke te omogućava rotaciju samo oko jedne osi rotacije [19] i prikazana je na Slici 5.7.



Slika 5.7: Hinge veza [19]

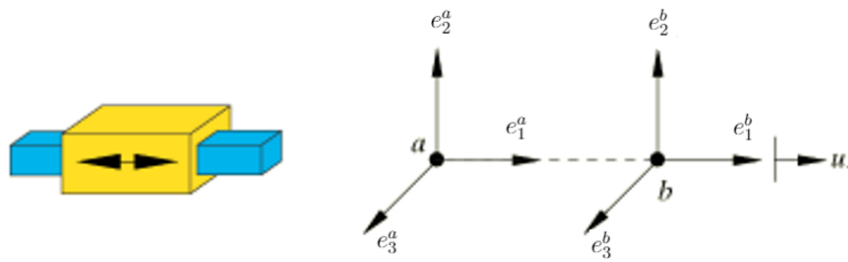
5.6.3. Translator

Različiti dijelovi modela mogu se vrlo lako povezati preko *Translator* veza koja je građena od osnovnih veza *Slot* i *Align*. U vezi *Slot* položaj točke b ostaje na pravcu definiranom orijentacijom točke a i b [19]. *Slot* veza prikazana je na Slici 5.8 te se vidi da je pravac kretanja točke b vektor e_1^a .



Slika 5.8: Slot veza [19]

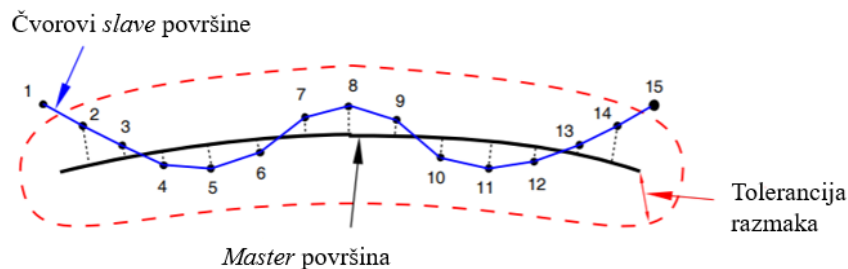
Veza *Align* uspostavlja vezu između lokalnih koordinatni sustava točke a i b . Ukoliko se lokalni koordinatni sustavi točaka ne poklapaju, početni zakret između koordinatnih sustava se održava konstantnim tijekom analize. Konačno, veza *Translator* kombinacija je *Slot* i *Align* veza te je prikazana na Slici 5.9 [19].



Slika 5.9: Translatorska veza [19]

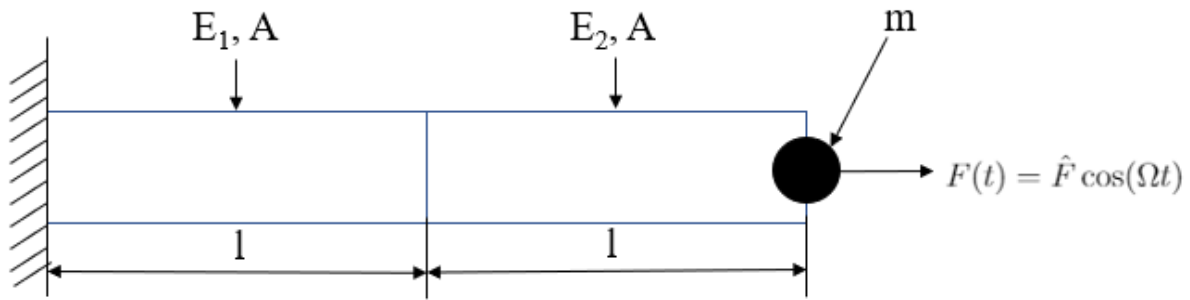
5.6.4. Tie

Za korištenje *Tie* veze potrebno je odrediti *master* i *slave* površinu. Čvorovi *slave* površine vežu se za čvorove *master* površine te se spriječava njihovo međusobno odvajanje. Ukoliko postoji razmak između *master* i *slave* plohe, programski paket *Abaqus*, ako korisnik odabere, prilagođava čvorove *slave* površine da naliježu na *master* površinu unutar neke tolerancije. Na Slici 5.10 prikazan je primjer nepreklapanja *master* i *slave* površina. Čvorovi unutar tolerancije razmaka bit će prilagođeni čvorovima *master* površine, dok će čvorovi 1 i 15, koji su izvan tolerancije, ostati nepovezani s površinom [19].

Slika 5.10: Zona tolerancije *Tie* veze [19]

5.7. Verifikacija modela

Za verifikaciju modela prigušenja odabran je model štapa, zanemarive mase, sastavljenog od dva dijela, prikazanog na Slici 5.11. Analitički i numerički izračunata je prva vlastita frekvencija i iznos amplitude u rezonanciji korištenjem Rayleigh-evog prigušenja.



Slika 5.11: Verifikacijski model

Podaci potrebni za rješavanje problema odabani su proizvoljno:

$$\begin{aligned}
 A &= 400 \text{ mm}^2, \\
 l &= 50 \text{ mm}, \\
 E_1 &= 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \\
 E_2 &= 105000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \\
 m &= 100 \text{ kg} = 0,1 \text{ t}, \\
 \hat{F} &= 500 \text{ N}.
 \end{aligned} \tag{5.25}$$

Diferencijalna jednačba gibanja sustava s jednim stupnjem slobode gibanja (Slika 5.11) glasi:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t). \tag{5.26}$$

Ako se u jednačbi (5.26) uzme da je $c = 0$ i $F(t) = 0$, dobije se diferencijalna jednačba gibanja slobodnih neprigušenih vibracija:

$$m\ddot{x} + kx = 0. \tag{5.27}$$

Ta se jednačba može napisati u obliku:

$$\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0 \tag{5.28}$$

ili:

$$\ddot{x} + \omega_n^2 x = 0, \tag{5.29}$$

pri čemu je [20]:

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m}, \text{ tj. } \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{5.30}$$

vlastita kružna frekvencija slobodnih neprigušenih vibracija. Krutost k pojedinih dijelova štapa računa se prema izrazu [20]:

$$k = \frac{AE}{l}, \tag{5.31}$$

te tako za prvi i drugi dio štapa dobivene su krutosti:

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{AE_1}{l} = \frac{400 \cdot 210000}{50} = 1680000 \frac{\text{N}}{\text{mm}}, \\ k_2 &= \frac{AE_2}{l} = \frac{400 \cdot 105000}{50} = 840000 \frac{\text{N}}{\text{mm}}. \end{aligned} \quad (5.32)$$

Krutost cijelog štapa ekvivalentna je krutosti serijskog spoja dviju opruga [20]:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}, \quad (5.33)$$

tj.

$$k = \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2} = \frac{1680000 \cdot 840000}{1680000 + 840000} = 560000 \frac{\text{N}}{\text{mm}}. \quad (5.34)$$

Iz izraza (5.30) dobiva se prvu vlastitu kružnu frekvenciju sustava:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{560000}{0,1}} = 2366,432 \frac{\text{rad}}{\text{s}}. \quad (5.35)$$

Prva frekvencija sustava iznosi [20]:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{2366,432}{2\pi} = 376,629 \text{ Hz}. \quad (5.36)$$

Iznos amplitude pomaka ovisno o frekvenciji uzbude prema [20] glasi:

$$\hat{x} = \frac{\hat{F}}{\sqrt{(k - m \Omega^2)^2 + (c \Omega)^2}}. \quad (5.37)$$

U rezonanciji je $\Omega = \omega_n$ i vrijedi, $k - m \Omega^2 = k - m \omega_n^2 = 0$, te se dobije:

$$\hat{x} = \frac{\hat{F}}{c \omega_n}. \quad (5.38)$$

Prigušenje c izračunava se iz bezdimenzijskog parametra prigušenja ζ iz izraza (5.15):

$$\zeta = \frac{c}{c_{kr}} = \frac{c}{2\sqrt{mk}}, \quad (5.39)$$

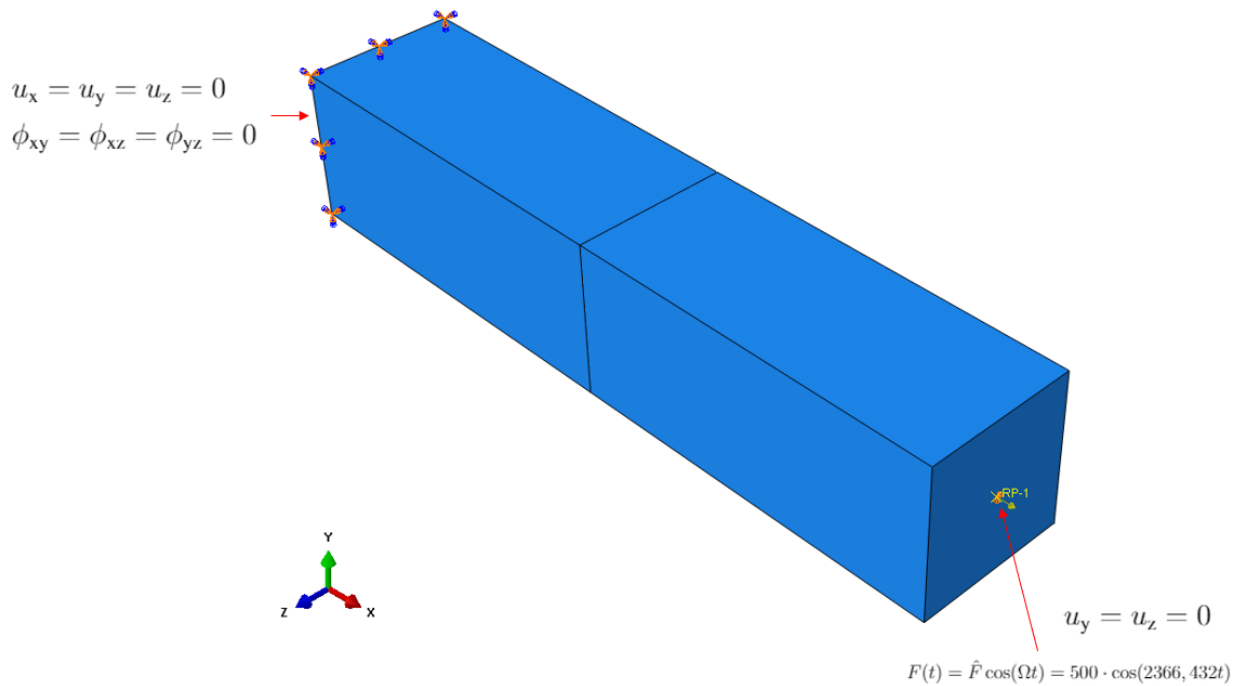
a odabran je bezdimenzijski parametar prigušenja $\zeta = 0,02$ te je dobiven iznos prigušenja:

$$c = 2\zeta\sqrt{mk} = 2 \cdot 0,02 \cdot \sqrt{0,1 \cdot 560000} = 9,4657 \frac{\text{Ns}}{\text{mm}}. \quad (5.40)$$

Iz izraza (5.38) dobiva se iznos amplitude pomaka u rezonanciji:

$$\hat{x} = \frac{\hat{F}}{c \cdot \omega_n} = \frac{500}{9,4657 \cdot 2366,432} = 0,0223215 \text{ mm}. \quad (5.41)$$

Nakon što je analitički određena prva vlastita frekvencija i amplituda pomaka u rezonanciji, model sa Slike 5.11 izrađen je u programskom paketu *Abaqus* te je prikazan na Slici 5.12. Za izradu modela korišteni su podaci iz izraza (5.25).



Slika 5.12: Verifikacijski model u Abaqus-u

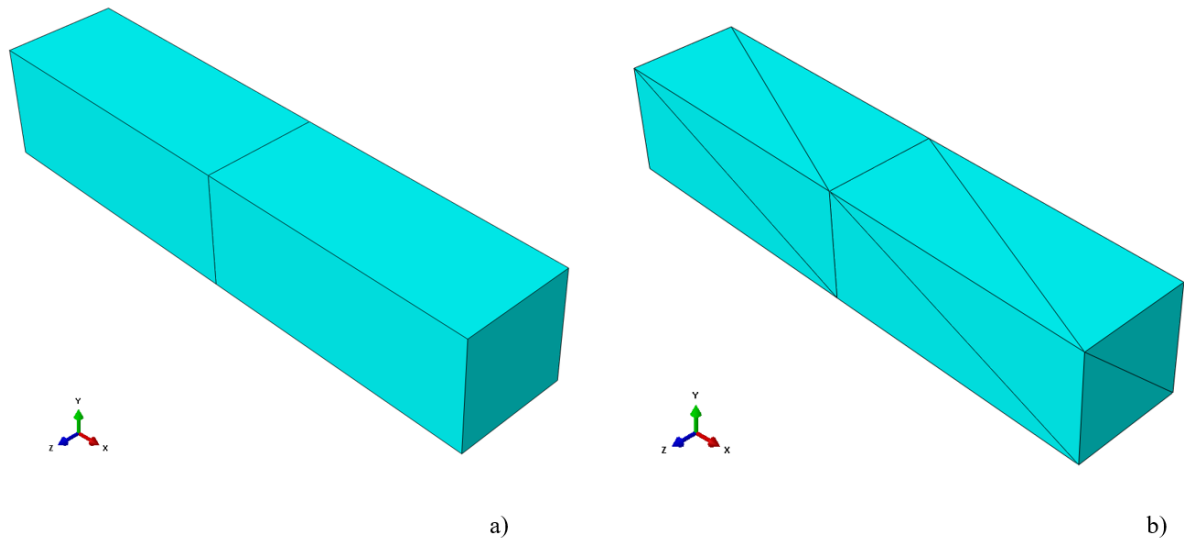
Korištenjem izraza 5.14, za odabrani bezdimenzijski parametar prigušenja $\zeta = 0,02$, izračunato je više kombinacija parametara Rayleigh-evog prigušenja α i β u rezonanciji:

$$0,02 = \frac{\alpha}{2 \cdot 2366,432} + \frac{\beta \cdot 2366,432}{2}. \quad (5.42)$$

Tablica 5.1: Parametri Rayleigh-evog prigušenja

$\alpha \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)$	$\beta \left(\frac{\text{s}}{\text{rad}}\right)$
0	$1,6903 \cdot 10^{-5}$
5	$1,60102 \cdot 10^{-5}$
50	$7,9745 \cdot 10^{-6}$
94,65725	0

Polovicama štapa zadana su materijalna svojstva prema Slici 5.11, dok je masa zadana u referentnoj točki. Frekvencijska analiza provedena je u *step-u Frequency*, a za izračun amplitude pomaka u rezonanciji korišten je *Dynamic, Implicit*. Proračun je proveden korištenjem heksaedarskih i tetraedarskih elemenata. Na Slici 5.13 prikazana je korištena mreža s 2 heksaedarska (C3D20) i 24 tetraedarska (C3D10) konačna elementa.



Slika 5.13: Mreža s: a) 2 heksaedarska i b) 24 tetraedarska konačna elementa

Korištenjem različitih parametara Rayleigh-evog prigušenja α i β iz Tablice 5.1, dobivene su jednake vrijednosti frekvencije i amplitude pomaka za heksaedarske i za tetraedarske konačne elemente. Iznos prve vlastite frekvencije sustava dobiven metodom konačnih elemenata identičan je analitičkom rješenju:

$$f_{n,MKE} = f_{n,analitičko} = 376,629 \text{ Hz.} \quad (5.43)$$

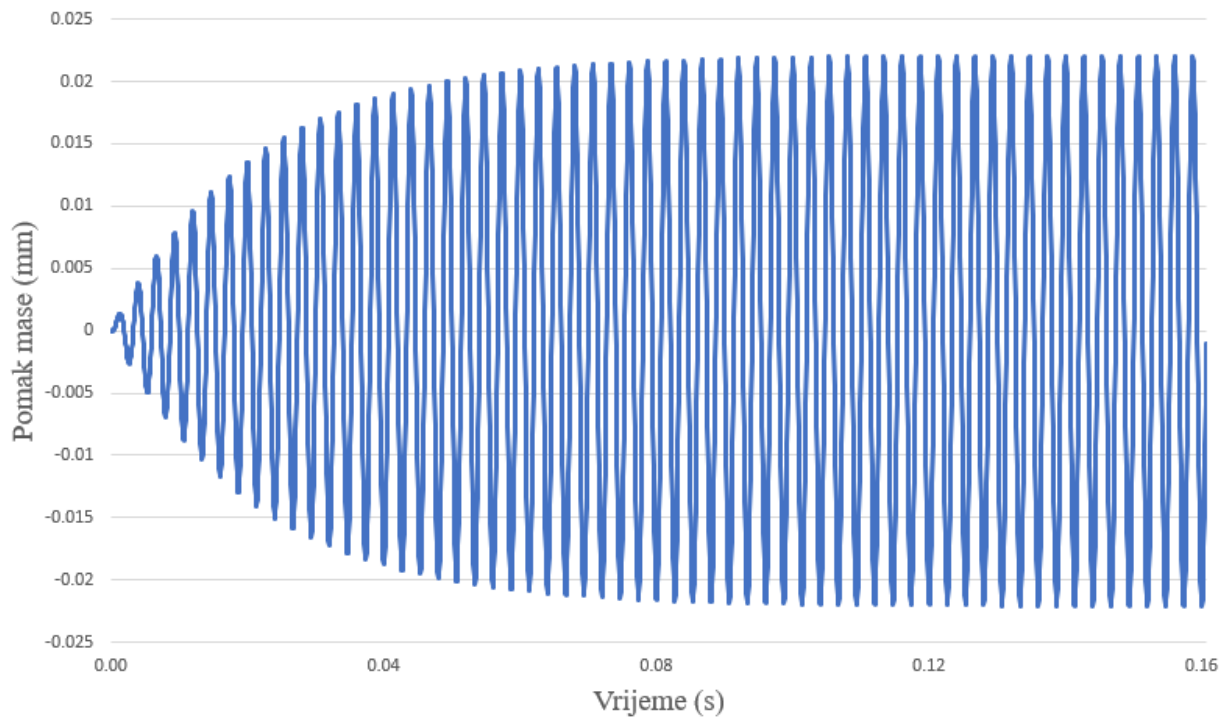
Iznosi amplitude pomaka mase u rezonanciji neznatno se razlikuju od analitičkog rješenja, što je prikazano u Tablici 5.2. Greška je izračunata prema izrazu:

$$G = \left(1 - \frac{\hat{x}_{MKE}}{\hat{x}_{analitičko}}\right) \cdot 100\%. \quad (5.44)$$

Tablica 5.2: Iznos amplitude pomaka u rezonanciji

\hat{x}_{MKE} (mm)	$\hat{x}_{analitičko}$ (mm)	Greška
0,0220735	0,0223214	1,111 %

Na Slici 5.14 prikazan je dijagram ovisnosti amplitude pomaka mase o vremenu. Vidljivo je da nakon određenog vremena dolazi do stabilizacije krivulje i da pomak teži konačnoj vrijednosti.



Slika 5.14: Ovisnost amplitude pomaka o vremenu

U daljnjoj analizi korišteni su tetraedarski konačni elementi koji omogućuju lakšu diskretizaciju složenije geometrije.

5.8. Numerički model kidalice

Kidalica sa Slika 4.3 i 4.4 sastoji se od ukupno 58 dijelova. Postojanje velikog broja dijelova i veza čini model kompleksnim za numeričku analizu i produljuje vrijeme trajanja simulacija. Budući da je veliki broj dijelova međusobno u krutoj vezi, pojedine dijelove kidalice moguće je spojiti u jedan dio. Analizom gibanja pojedinih dijelova, konstrukcijski model kidalice sveden je na pojednostavljeni model za numeričku analizu, koji se sastoji od 9 dijelova. Na Slici 5.15 prikazan je pojednostavljeni model kidalice, dok su na Slici 5.16 označeni pojedini dijelovi.



Slika 5.15: Pojednostavljeni model kidalice



Slika 5.16: Prikaz pojednostavljenih dijelova kidalice

U Tablici 5.3 dan je naziv dijelova koji su označeni na Slici 5.16. Sklop je u *Abaqus* uveden iz programa *Autodesk Inventor* u kojem je izrađen. Za potrebe numeričke analize, sa svih dijelova su uklonjene opcije *Fillet* i *Chamfer* koje su korištene duž rubova te su također popunjeni pojedini provrti. Promjena rješenja uzrokovana tim pojednostavljenjima je zanemariva, a vrijeme analize i broj konačnih elemenata su značajno smanjeni. Kako je ranije navedeno, ciklička kidalica ima mogućnost promjene amplitude pomaka uzorka. U ovom je radu odabrana najveća amplituda od 1 mm jer će se pri toj amplitudi javljati i najveće sile na podlogu.

Tablica 5.3: Nomenklatura pojedinih dijelova pojednostavljenog modela

Broj dijela	Naziv dijela
1	Fiksni dio postolja
2	Pomični dio postolja
3	Vratilo
4	Ekscentar
5	Kućište ekscentra
6	Klin
7	Cijev
8	Ispitni uzorak
9	Kapa cijevi

Kako bi se dijelovi međusobno povezali, korištene su kinematske veze opisane u potpoglavlju 5.6. Površine spojeva, za koje su korištene *Hinge* i *Translator* veze, prvo su s *distributing coupling* vezane na pripadajuće referentne točke u središtu spoja. Zatim su referentne točke međusobno spojene *wire* značajkom da bi se na njih mogla postaviti odgovarajuća *Hinge* ili *Translator* veza. Između vratila i pomičnog dijela postolja, na mjestu dva uležištenja, korištena je *Hinge* veza. Budući da se pomični i fiksni dio postolja ne gibaju jedan u odnosu na drugi, veza između njih ostvarena je preko *Tie* opcije. *Tie* veza je također korištena između vratila i ekscentra te je na taj način omogućeno da se ekscentar rotira zajedno s vratilom. Ekscentar svojim rotiranjem pomiče kućište koje povlači klin. Između ekscentra i kućišta postavljen je *surface-to-surface* kontakt. Za postavljanje kontakta korištena je *penalty* metoda koja sprječava prodiranje *slave* površine u *master* površinu. Korištenje *finite-sliding*-a omogućuje relativno razdvajanje, klizanje i rotaciju površina. Kao *master* ploha odabrana je unutarnja površina kućišta, dok je za *slave* plohu odabrana vanjska ploha ekscentra. Površine na koje je postavljen kontakt prikazane su na Slici 5.17. Budući da se kućište, uslijed gibanja zbog djelovanja ekscentra, na mjestu spoja s klinom zakreće, između njih postavljena je *Hinge* veza. Kako bi se osiguralo da klin klizi unutar ležišta fiksnog postolja korištena je opcija *Translator*. Ostale veze u modelu, tj. veza ispitnog uzorka s kapom cijevi i klinom te veza cijevi s kapom i fiksnim postoljem, krute su veze i ostvarene su s *Tie* značajkom. Dva elektromotora koja će služiti za pogon vratila i za pomicanje pomičnog dijela postolja nisu modelirana, već su samo korištene njihove predviđene mase koje iznose 1,5 kg. Njihove mase su korištenjem opcije *point mass* zadane u referentnim točkama, koje se nalaze u težištima motora i koje su preko *distributing coupling* veze spojeni na mjesta koja su predviđena za prihvat motora.



Slika 5.17: Kontakt između ekscentra i kućišta

Svi dijelovi, osim ispitnog uzorka i cijevi, napravljeni su od čelika. Cijev je izrađena od PMMA materijala, dok je ispitni uzorak izrađen od staklenim vlaknima ojačanog kompozita (eng. *Glass fiber reinforced polymer-GFRP*). Mehanička svojstva navedenih materijala dana su u Tablici 5.4.

Tablica 5.4: Mehanička svojstva materijala

Materijal	Gustoća ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	Modul elastičnosti (MPa)	Poissonov faktor
Čelik	7850	210000	0,3
PMMA	1208	3000	0,3
GFRP	2100	15000	0,3

Predviđeno je da ciklička kidalica bude vijcima pričvršćena za rotacijski stol tomografa. Provrti za vijke su *disturbuting coupling* vezom spojeni s referentnom točkom u u dnu kidalice. Na tu referentnu točku zadan je rubni uvjet uklještenja koji je prikazan na Slici 5.18. Budući da je cilj ovog diplomskog rada odrediti silu koja se stvara na podlogu, iz ove referentne točke očitane su reakcijske sile.



Slika 5.18: Rubni uvjet uklještenja

Generiranje mreže i provjera konvergencije napravljeni su tijekom frekvencijske analize.

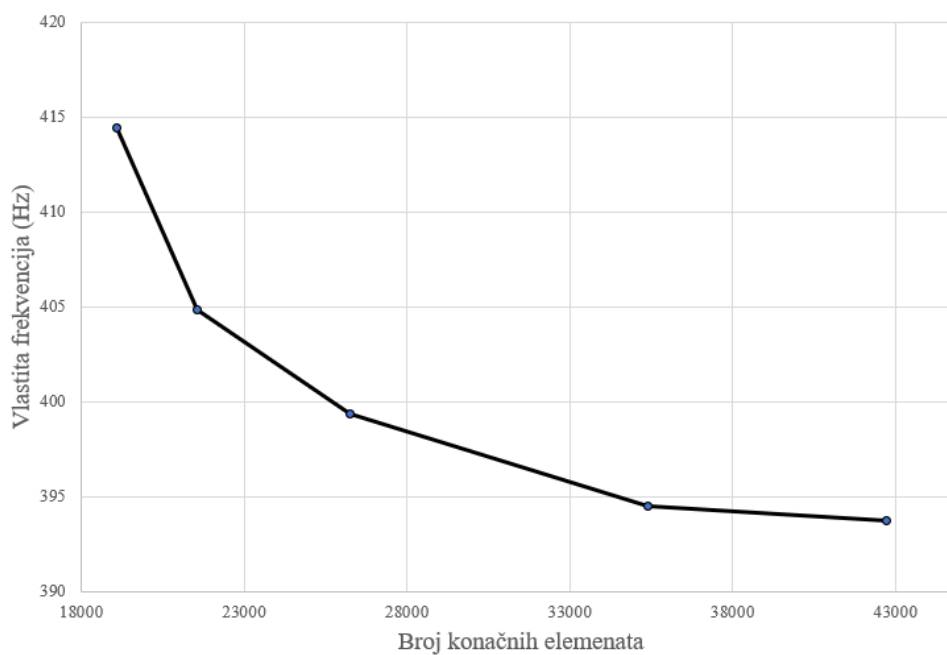
5.9. Frekvencijska analiza cikličke kidalice

Za provedbu dinamičke analize kidalice korisno je prvo provesti frekvencijsku analizu, odrediti vlastite frekvencije i usporediti ih s frekvencijama uzbude. Frekvencijska analiza provedena je u *step-u Frequency*. Kao metoda proračuna izabrana je *Lanczos* metoda, a izračunato je prvih 10 vlastitih vrijednosti. U modulu *Mesh* generirano je 5 mreža i na svakoj je provedena frekvencijska analiza dok nije postignuta željena konvergencija. Prva mreža imala je 19078, druga 21566, treća 26238, četvrta 35400 i peta 42728 konačnih elemenata. U analizi su korišteni C3D10 konačni elementi. Posljednja generirana mreža korištena je u provedbi dinamičkih analiza jer je za nju dobiveno konvergirano rješenje vlastitih frekvencija. Na Slici 5.19 prikazane su najrjeđa i najgušća mreža. Budući da se vlastite frekvencije izračunavaju za sustav bez prigušenja, prigušenje u ovom koraku nije potrebno odrediti.



Slika 5.19: Mreža s a) 19078 i b) 42728 konačnih elemenata

Budući da prva vlastita frekvencija brzo konvergira, na Slici 5.20 prikazana je konvergencija rješenja za petu vlastitu frekvenciju, a u Tablici 5.5 dani su iznosi prvih 5 vlastitih vrijednosti.

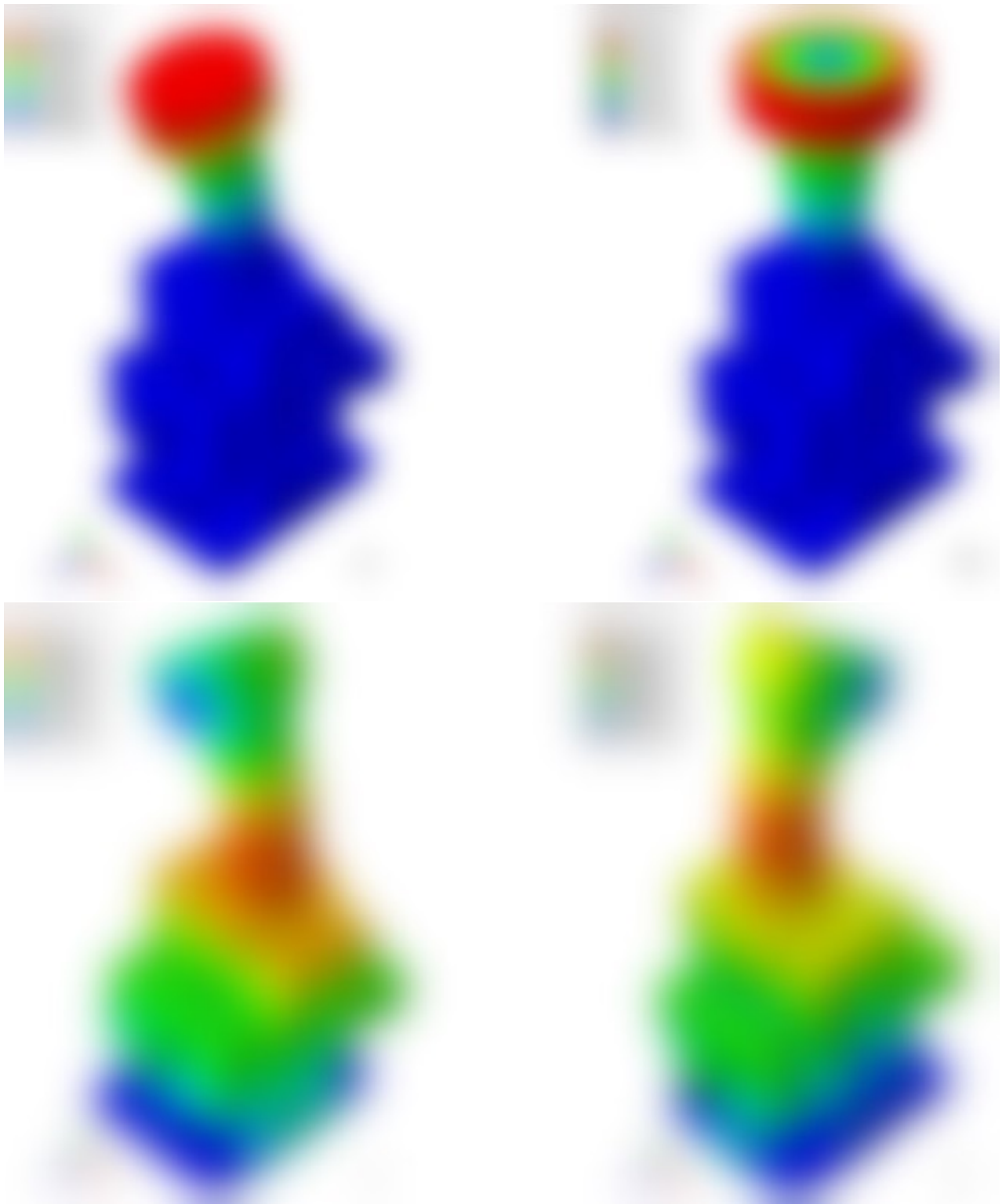


Slika 5.20: Konvergencija rješenja pete vlastite frekvencije

Tablica 5.5: Vlastite frekvencije kidalice

Redni broj	Iznos vlastite frekvencije (Hz)
1.	78,181
2.	79,491
3.	218,32
4.	310,38
5.	393,7

Iznos prve vlastite frekvencije, koja je prikazana na Slici 5.21, je 78,181 Hz, što je iznad predviđene frekvencije rada kidalice od 50 Hz. Najslabijom komponentom kidalice pokazala se PMMA cijev koja ima i najslabija mehanička svojstva. Iznos prve vlastite frekvencije moguće je dodatno povećati korištenjem deblje cijevi ili korištenjem materijala veće krutosti. Prve tri vlastite frekvencije kidalice odnose se na fleksiju i torziju cijevi. Četvrta i peta vlastita frekvencija odnose se na fleksiju čitave kidalice. Iznosi treće, četvrte i pete vlastite frekvencije iznad su predviđene frekvencije rada kidalice. Na Slici 5.21 prikazane su glavne forme vibriranja dinamičke kidalice.



Slika 5.21: Glavne forme vibriranja dinamičke kidalice: a) prva i druga, b) treća, c) četvrta, d) peta

Nakon što su dobivene vlastite frekvencije, moguće je uz pomoć izraza (5.14) izračunati koeficijente α i β . Za modeliranje prigušenja odabrane su prve dvije vlastite frekvencije, $\omega_{n,1} = 78,181$ Hz i $\omega_{n,2} = 79,491$ Hz. Bezdimenzijski koeficijent prigušenja, koji je odabran za obje

vlastite frekvencije, iznosi $\zeta = 0,02$. Dobiveni koeficijenti α i β glase:

$$\begin{aligned}\alpha &= 9,90614 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \\ \beta &= 4,03762 \cdot 10^{-5} \frac{\text{s}}{\text{rad}}.\end{aligned}\tag{5.45}$$

5.10. Dinamička analiza kidalice

Za dinamičku analizu cikličke kidalice korišten je *Dynamic, Implicit*. Budući da je cilj rada odrediti amplitude sile prenesene s kidalice na podlogu s obzirom na kružne frekvencije rada kidalice, opterećenje je u ovom koraku zadavano na vratilo u obliku kutne brzine. Na Slici 5.22 prikazana je referentna točka koja je *distributing coupling* vezom povezana s površinom na koju se preko remenice s motora prenosi snaga. Unutar svojstava materijala dodano je prigušenje s koeficijentima iz izraza (5.45).



Slika 5.22: Rubni uvjet kutne brzine

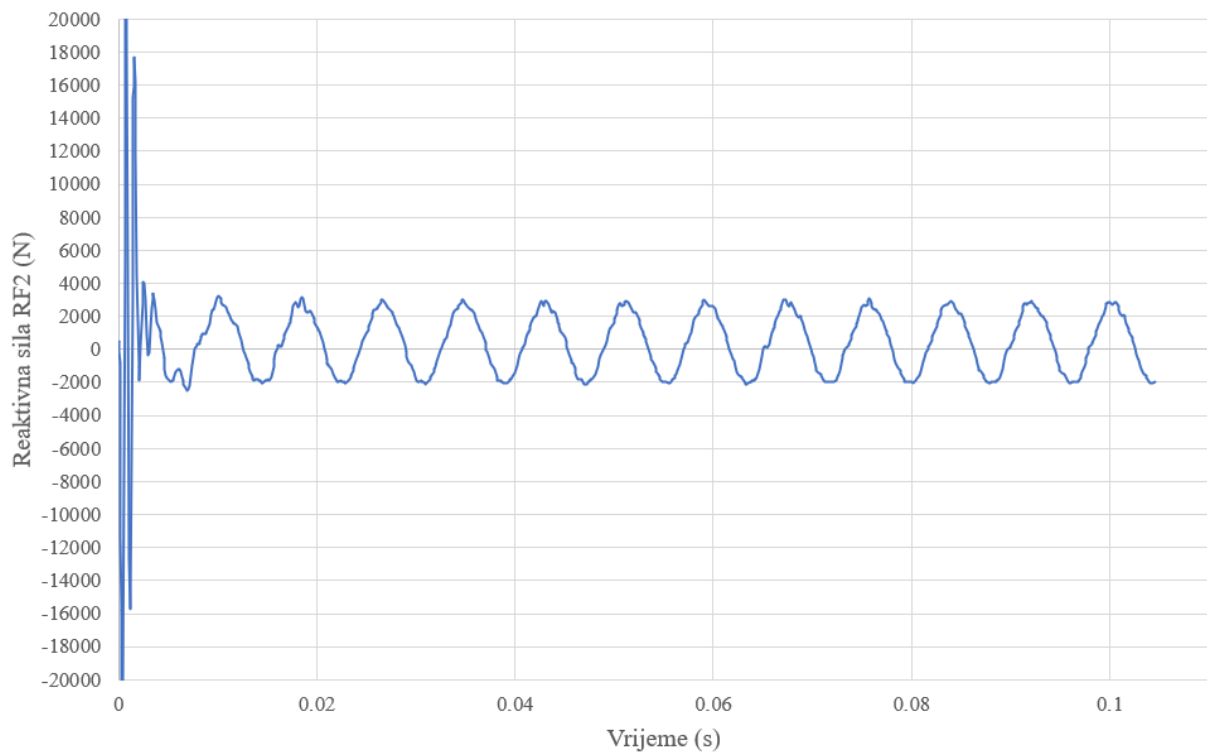
Provedene su 22 numeričke simulacije, gdje su mijenjane kutne brzine vratila ovisno o traženoj frekvenciji opterećenja. Simulacijama je pokrivena frekvencijska domena 0-100 Hz s korakom od 5 Hz. Realni model kidalice predviđen je za rad do 50 Hz, a proračunom do 100 Hz pokriveno je područje prve vlastite frekvencije kidalice. Kako je već ranije navedeno, uzet je najkonzervativniji

slučaj kada je amplituda pomaka ispitnog uzorka 1 mm. Na Slici 5.23 prikazan je model kidalice kada je ispitni uzorak u donjoj mrtvoj točki (pomak 1 mm) i gornjoj mrtvoj točki (pomak -1 mm).



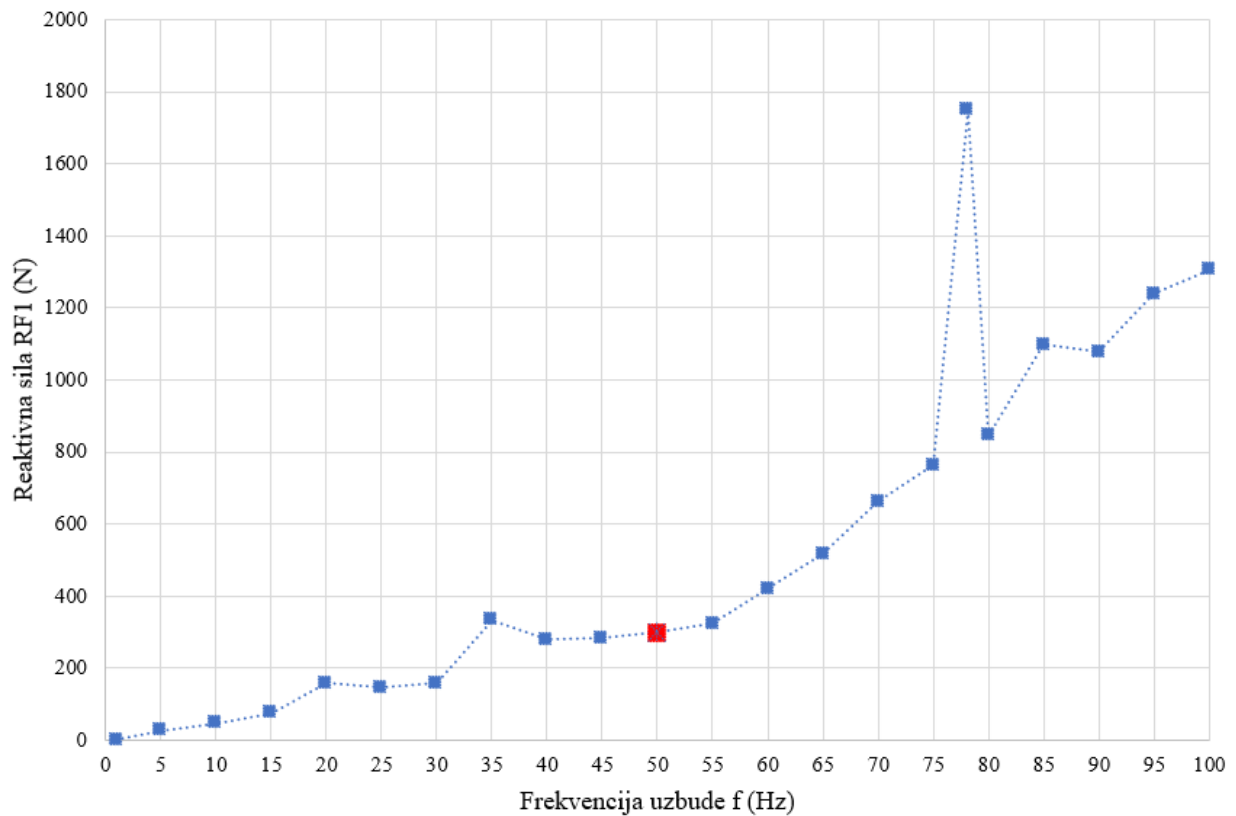
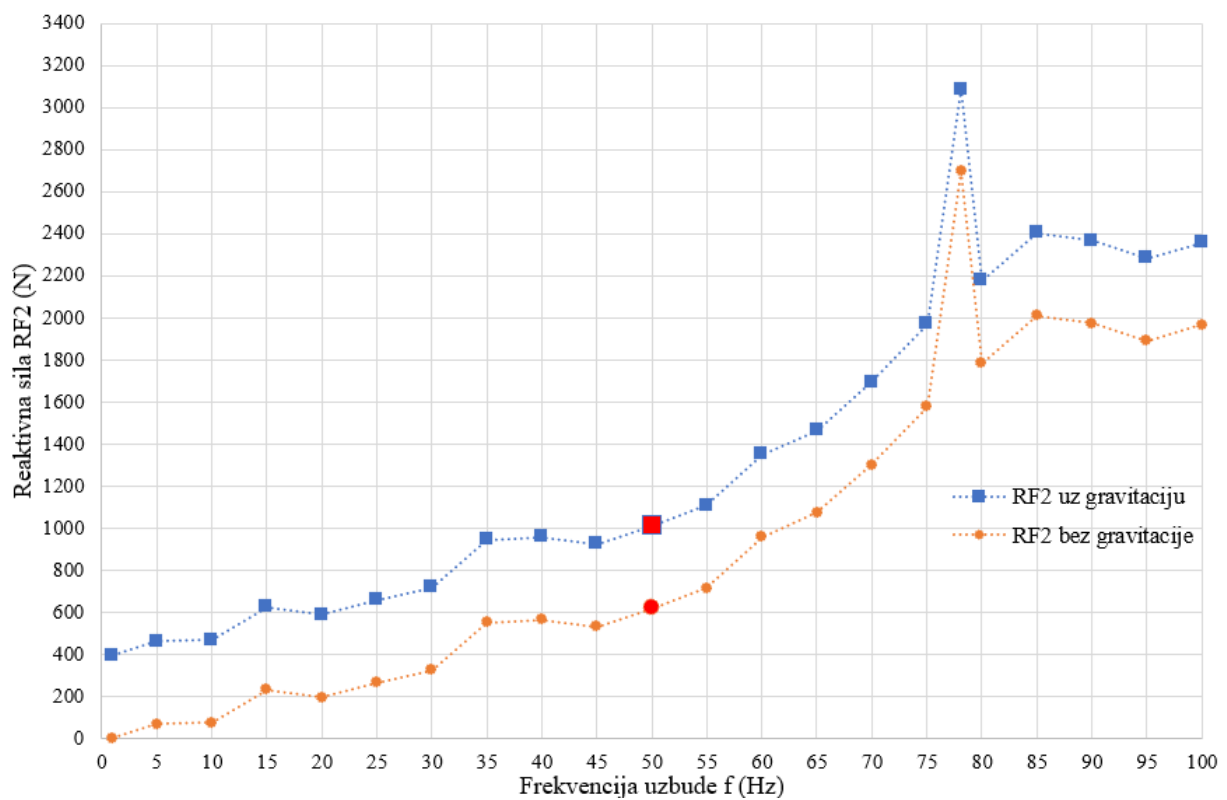
Slika 5.23: Pomaci ispitnog uzorka u: a) donjoj mrtvoj točki i b) gornjoj mrtvoj točki

Na Slici 5.24 dan je prikaz odziva reaktivne sile u smjeru osi y u ovisnosti o vremenu za frekvenciju uzbude od 78,181 Hz. Vidljivo je da na početku djelovanja uzbude dolazi do naglog skoka iznosa sile koji se nakon nekoliko ciklusa stabilizira. Izvor tog naglog skoka je način zadavanja opterećenja na vratilo koje je postavljeno tako da se iznos kutne brzine vratila odjednom promijeni npr. za rezonanciju iz 0 rad/s u iznos 491,23 rad/s, što numeričkom sustavu predstavlja problem. Tada dođe do nagle promjene u sustavu i dobiju se nefizikalni iznosi sile. U realnom modelu to neće biti slučaj jer će se zakret vratila regulirati motorom. Krivulja sile se nakon par ciklusa stabilizira te se dobije periodična promjena sile.



Slika 5.24: Ovisnost reaktivne sile RF2 u ovisnosti o vremenu za frekvenciju uzbuđenja od 78,181 Hz

Krivulja ovisnosti sile o vremenu imala je sličan oblik za sve iznose frekvencija. Za daljnju analizu uzimani su maksimalni iznosi stacionarnog odziva reaktivne sile. Reaktivna sila RF3 u smjeru osi z je dva reda veličine manja od iznosa reaktivnih sila u smjeru osi x i y te je zanemarena. Na Slikama 5.25 i 5.26 prikazana je promjena reaktivnih sila RF1 i RF2 ovisno o frekvencijama uzbuđenja. Budući da u literaturi ne postoji eksplicitni iznos maksimalne sile koja smije djelovati na rotacijski stol tomografa, proizvoljno je zadan iznos od 1000 N.

Slika 5.25: Promjena reaktivne sile RF1 ovisno o frekvenciji uzbuđe f Slika 5.26: Promjena reaktivne sile RF2 ovisno o frekvenciji uzbuđe f

Porastom uzbuđne frekvencije rastu iznosi reaktivne sile na podlogu, koji svoj najveći iznos postižu u rezonanciji. Crtkanim linijama prikazan je trend promjene sile. Nakon prolaska rezo-

nancije dolazi do pada iznosa sile, koja porastom frekvencije opet počinje rasti. Na Slici 5.26 plavim kvadratićima označeni su iznosi reaktivne sile u smjeru osi y kojima je pridodana težina samog uređaja koja dodatno djeluje na rotacijski stol tomografa. Na Slikama 5.25 i 5.26 crvenim su oznakama označeni iznosi sile koji se javljaju pri frekvenciji uzbude od 50 Hz, koja predstavlja maksimalni iznos uzbude kojom će raditi ciklička kidalica. Iznos sile RF1 pri frekvenciji 50 Hz manji je od dopuštenih 1000 N. Iznos sile RF2 malo je iznad dopuštenih 1000 N, ali potrebno je naglasiti da se radi o slučaju kada je amplituda pomaka uzorka 1 mm, što u realnom slučaju nikada neće biti pri 50 Hz. Amplituda pomaka uzorka od 1 mm namijenjena je za frekvencije uzbude manje od 10 Hz, a na Slikama 5.25 i 5.26 vidljivo je da iznosi sile ne prelaze 1000 N. Stoga se može zaključiti da kidalica zadovoljava kriterije u radnim uvjetima. Smanjenjem amplitude pomaka uzorka, smanjili bi se i iznosi reaktivnih sile na Slikama 5.25 i 5.26.

6. Zaključak

U ovom radu provedena je numerička analiza cikličke in-situ kidalice namijenjene za ispitivanje materijala unutar CT skenera, u prvom redu kompozita ojačanih vlaknima. Kompoziti ojačani vlaknima ističu se po tome što im je moguće optimirati svojstva, povećati čvrstoću, a da pri tome zadrže malu masu. Zbog toga sve više zamjenjuju konvencionalne materijale te svoju primjenu najviše pronalaze u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji. Mehanička svojstva kompozita ovise ponajviše o heterogenoj strukturi, raspodjeli i udjelu konstituenata, a utječu na pojavu različitih mehanizama oštećenja uvjetovanih arhitekturom vlakana. Iz tog razloga, proučavanje detekcije i rasta oštećenja kompozita tema su brojnih istraživanja.

Nerazorne metode ispitivanja, svojim velikim napretkom, daju uvid u fenomene koji se javljaju prilikom opterećivanja kompozitnih materijala. Računalna tomografija X-zrakama pruža mogućnost procjene stanja na površini i unutar opterećenog uzorka tijekom cijelog ispitivanja. In-situ ispitivanja, kod kojih se uzorak istovremeno opterećuje i skenira, zahtijevaju prilagodbu eksperimentalnog postava i izradu posebnih uređaja za ispitivanje koji stanu unutar CT skenera, a da pri tome ne ometaju proces skeniranja. Jedan od uređaja, namijenjen za rad unutar CT skenera, konstruiran je za potrebe projekta FULLINSPECT te je numerički proračunat u ovom radu. Ključni dio numeričkog proračuna predstavlja procjena vibracija i sila koje djeluju na podlogu, odnosno zakretni stol tomografa. U odnosu na ostale kidalice koje postoje na tržištu, ova kidalica pruža mogućnost promjene amplitude pomaka ispitnog uzorka od 0,01 mm do 1 mm s uzbudnom frekvencijom od 0 do 50 Hz, što omogućuje provođenje širokog spektra cikličkih ispitivanja.

U ovom radu izrađen je pojednostavljeni model kidalice primjeren za numeričku analizu te je proučavan najkonzervativniji slučaj opterećivanja kada amplituda pomaka iznosi 1 mm, a uzbudna frekvencija 50 Hz. U stvarnosti se takva ispitivanja neće provoditi, ali su u ovom radu razrađena jer pružaju uvid u najveće sile koje mogu djelovati na rotacijski stol tomografa. Dobivene vlastite frekvencije kidalice veće su od maksimalnih uzbudnih frekvencija te se dodatno mogu povećati modificiranjem debljine PMMA potpore ili korištenjem cijevi od materijala s većom krutosti. Provođenjem niza simulacija unutar domene od 0 do 100 Hz određene su sile kojima predloženi ispitni uređaj djeluje na podlogu. Najveći iznosi sile na podlogu javljaju se u rezonanciji, dok su sile prilikom uzbudne frekvencije od 50 Hz otprilike jednake dopuštenim silama od 1000 N. Ako se uzme u obzir da je ovo najkonzervativniji slučaj, može se zaključiti da ciklička kidalica zadovoljava potrebne kriterije vezane uz maksimalni dopušteni iznos sile od 1000 N. Kako bi se rezultati dobiveni u ovom radu dodatno validirali, predlaže se provođenje numeričkih simulacija kod kojih bi se mi-

jenjale amplitude pomaka ispitnog uzorka i uzbudne frekvencije te tako stekao detaljniji uvid u sile koje se mogu javiti na rotacijskom stolu tomografa uslijed cikličkih ispitivanja.

LITERATURA

- [1] Tomičević Z., Bouterf A., Surma R., and Hild F. *Damage observation in glass fiber reinforced composites via μ -tomography*. Materials Today: Proceedings, 2019.
- [2] Noel Perie j., Leclerc H., Roux S., and Hild F. *Digital image correlation and biaxial test on composite material for anisotropic damage law identification*. Journal of Solids and Structures, 2009.
- [3] Smojver I. *Mehanika kompozitnih materijala*. Fakultet Strojарstva i Brodogradnje, Zagreb, 2016./17.
- [4] Filetin T., Kovačić F., and Indof J. *Svojstva i primjena materijala: čelici i željezni ljevovi, laki i obojeni metali, konstrukcijska keramika, polimerni materijali, kompozitni materijali i drvo*. Fakultet Strojарstva i Brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [5] Garafulić E. *Detekcija i procjena oštećenja kompozitnih struktura primjenom aktivne metode infracrvene termografije, Doktorska disertacija*. Fakultet elektrotehnike, strojарstva i brodogradnje, Split, 2013.
- [6] Okoli O. I. and Smith G. F. *Failure modes of fibre reinforced composites: The effects of strain rate and fibre content*. Journal of materials, 1998.
- [7] Taams M. *Damage Mechanisms in Composite Materials*. Delft University of Technology, 2020.
- [8] Gholizadeh S. *A review of non-destructive testing methods of composite materials*. XV Portugese Conference on Fracture, Portugal, 2016.
- [9] Mađerić G. *Određivanje rezolucije pomaka i deformacija metodom korelacije digitalnih volumena na epoksidnoj smoli ojačanoj staklenim vlaknima*. Fakultet Strojарstva i Brodogradnje, Zagreb, 2019.
- [10] Cantatore A. and Muller P. *Introduction to computed tomography*. DTU Mechanical Engineering.
- [11] Buljac A., Jailin C., Mendoza A., Neggers J., Taillandier-Thomas T., Bouterf A., Smaniotto B., Hild F., and Roux S. *Digital Volume Correlation: Review of progress and Challenges*. Society for Experimental Mechanics, 2018..

- [12] Garcea S. A., Wang Y., and Withers P. J. *X-ray computed tomography of polymer composites*. Composites Science and Technology, 2018..
- [13] Buffiere J. Y., Ferrie E., Proudhon H., and Ludwig W. *Three-dimensional visualisation of fatigue cracks in metals using high resolution synchrotron X-ray micro-tomography*. Material Science and Technology, 2006.
- [14] Messenger A., Junet A., Palin-Luc T., Buffiere J. Y., Saintier N., Ranc N., El May M., Gail- lard A., Y.King, and Bonnin A. *In situ synchrotron ultrasonic fatigue testing device for 3D characterisation of internal crack initiation and growth*. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2020.
- [15] Sorić J. *Metoda konačnih elemenata*. Golden Marketing-Tehnička knjiga, Zagreb, 2004.
- [16] Novak M. *Numeričko optimiranje krutosti konstrukcije*. Fakultet Strojарstva i Brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [17] Tonković Z. *Materijali s predavanja iz kolegija Numerička analiza konstrukcija*.
- [18] Bijelić N. *Nelinearni dinamički proračun nadogradnje poslovnog tornja Cibona u Zagrebu*. Građevinski fakultet, Zagreb, 2010.
- [19] Abaqus Analysis User's Guide. Dassault Systemes, 2016.
- [20] Pustaić D., Wolf H., and Tonković Z. *Mehanika III*. Golden Marketing-Tehnička knjiga, Zagreb, 2005.